



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΣΤΕΡΕΑΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗ ΒΙΟΙΑΤΡΙΚΗ

**Μελέτη οπτικού συστήματος ελεύθερου χώρου σε περιβάλλον με
διαλείψεις μικρής έντασης**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΑΡΑΒΑΣΙΔΗΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ

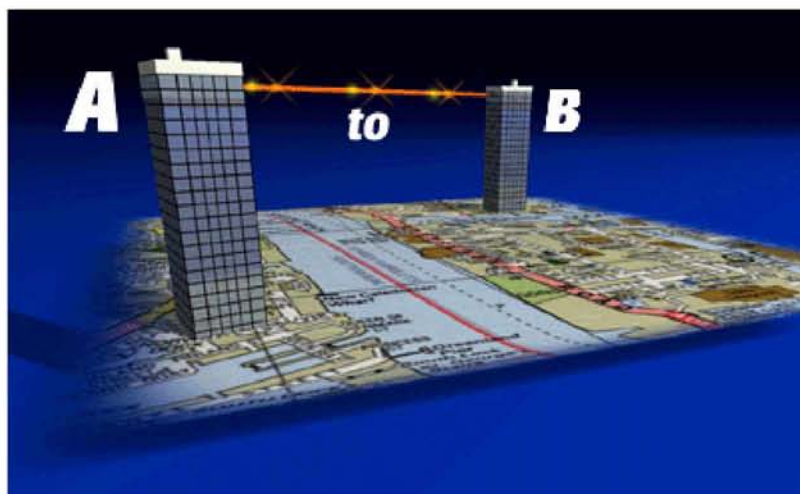
Επιβλέπων : ΧΑΡΙΛΑΟΣ ΣΑΝΔΑΛΙΔΗΣ, Λέκτορας

Λαμία, Φεβρουάριος 2011

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΣΤΕΡΕΑΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΗ

**Μελέτη οπτικού συστήματος ελεύθερου χώρου σε περιβάλλον με
διαλείψεις μικρής έντασης**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΚΑΡΑΒΑΣΙΔΗΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ

Επιβλέπων :ΧΑΡΙΛΑΟΣ ΣΑΝΔΑΛΙΔΗΣ, Λέκτορας

Λαμία, Φεβρουάριος 2011

Αφιερώνεται στους γονείς μου και στον αδερφό μου.

Περίληψη

Οι οπτικές επικοινωνίες ελεύθερου χώρου (Free Space Optics-FSO) αναφέρονται στη μετάδοση τηλεπικοινωνιακών σημάτων μέσω της ατμόσφαιρας χρησιμοποιώντας διαμορφωμένες δέσμες laser σε μήκη κύματος κυρίως των 850nm και 1550nm. Τα συστήματα αυτά έχουν προταθεί ως εναλλακτικές μορφές επικοινωνίας μεταξύ δυο σημείων εξαιτίας του μεγάλου εύρους ζώνης τους, και σε περιπτώσεις όπου άλλα μέσα μετάδοσης δεν είναι διαθέσιμα λόγω κόστους ή έλλειψης υποδομών (π.χ. οπτικές ίνες). Η απόδοσή τους, ωστόσο, επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό από διάφορα καιρικά φαινόμενα και από μορφές διαλείψεων στην ένταση του οπτικού σήματος που είναι γνωστές στη βιβλιογραφία ως δίνες-στροβιλισμοί (turbulence). Αυτό οδηγεί πολλές φορές στην επιδείνωση της ποιότητας των προσφερόμενων υπηρεσιών με αντίκτυπο τη συχνή διακοπή επικοινωνίας. Για τη βελτίωση της απόδοσής τους έχει προταθεί η χρησιμοποίηση κατάλληλων διαμορφώσεων και κωδικοποιήσεων.

Στην εργασία αυτή περιγράφονται τα χαρακτηριστικά του καναλιού με διαλείψεις μικρής έντασης οι οποίες μοντελοποιούνται με την λογαριθμοκανονική (log-normal) κατανομή και λευκό Γκαουσιανό θόρυβο σε ένα επίγειο ασύρματο οπτικό σύστημα διαμόρφωσης έντασης και άμεσης ανίχνευσης (Intensity Modulation/Direct Detection) με on-off keying (OOK). Δίνονται αναλυτικές εκφράσεις της πιθανότητας διαλείψεων και του ρυθμού σφάλματος δυαδικού ψηφίου (bit-error rate-BER) και παρουσιάζεται η απόδοση τους με τη βοήθεια κατάλληλων σχημάτων. Η παρούσα εργασία αποτελεί χρήσιμο θεωρητικό εφόδιο για την πρακτική υλοποίηση και εφαρμογή των συστημάτων αυτών.

Λέξεις Κλειδιά

Οπτικές Επικοινωνίες Ελεύθερου Χώρου, Ασύρματες Οπτικές Επικοινωνίες, Διαλείψεις, Κανάλι, Laser, Πομπός, Δέκτης, Στροβιλισμοί, Λογαριθμοκανονική Κατανομή.

Abstract

Free space optical communications transmit signals through atmospheric channels using modulated laser beams at wavelengths mainly at 850nm or 1550 nm. These systems have been proposed in order to provide high bandwidth point to point communications when traditional wireless communications systems are prohibited due to their extreme deployment cost. Their performance, however, is significantly affected by adverse weather conditions and fading in the irradiance of optical signals known as turbulence, leading to deterioration in the quality of services and in frequent outage appearance. To improve the overall performance, proper modulation and coding schemes have been proposed.

This paper describes the characteristics of an atmospheric channel under weak turbulence conditions, described by the log-normal distribution, and Gaussian noise of a terrestrial optical wireless system using Indirect Modulation/Direct Detection) with on-off-keying. Detailed expressions of the probability of fade, and the bit-error rate are presented using appropriate graphs. The paper provides a useful theoretical framework for the implementation and application of these systems, in practice.

Key Words

Free Space Optical Communications, Optical Wireless Communications, Fading, Channel, Laser, Transmitter, Receiver, Turbulence, Log-Normal distribution.

Πίνακας Περιεχομένων

| | |
|--|----|
| Περίληψη | 4 |
| Abstract..... | 5 |
| Πίνακας Περιεχομένων..... | 6 |
| Πίνακας Σχημάτων | 9 |
| 1. Πρόλογος | 11 |
| 1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 11 |
| 1.2 ΔΟΜΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ..... | 12 |
| 1.3 ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ..... | 14 |
| 2. Τεχνολογία Συστημάτων FSO | 15 |
| 2.1 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ..... | 15 |
| 2.2 ΒΑΣΙΚΗ ΔΟΜΗ | 17 |
| 2.3 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ..... | 18 |
| 2.4 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ - ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ..... | 20 |
| 2.4.1 Πλεονεκτήματα..... | 20 |
| 2.4.2 Μειονεκτήματα-Περιορισμοί..... | 21 |
| 2.5 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΣΥΡΜΑΤΟΥ ΟΠΤΙΚΟΥ ΚΑΝΑΛΙΟΥ | 21 |
| 2.5.1 Ατμοσφαιρικοί σπινθηρισμοί (scintillations)..... | 21 |
| 2.5.2 Καιρικές συνθήκες..... | 23 |
| 2.5.3 Τοποθέτηση πομπού-δέκτη..... | 24 |

| | |
|---|----|
| 2.5.4 Φυσικά εμπόδια..... | 25 |
| 2.5.5 Σεισμική δραστηριότητα..... | 25 |
| 2.5.6 Ατμοσφαιρική εξασθένιση της ισχύος ακτινοβολίας <i>laser</i> | 25 |
| 2.5.7 Πηγές Θορύβου | 29 |
| 2.5.7.1 Θερμικός Θόρυβος..... | 29 |
| 2.5.7.2 Σκοτεινό Ρεύμα Ανιχνευτή..... | 30 |
| 2.5.7.3 Φως Περιβάλλοντος..... | 30 |
| 2.5.7.4 Λευκός θόρυβος..... | 31 |
| 3. Κριτήρια Επίδοσης Ασύρματων Οπτικών Συστημάτων | 32 |
| 3.1 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ | 32 |
| 3.1.1 Λόγος Σήματος προς Θόρυβο (SNR)..... | 32 |
| 3.1.2 Λόγος σήματος προς παρεμβολή συν θόρυβο (SINR)..... | 33 |
| 3.1.3 Ρυθμός σφάλματος δυαδικού ψηφίου (BER) | 34 |
| 3.1.4 Διακοπή Επικοινωνίας..... | 34 |
| 3.1.5 Ρυθμός μετάδοσης πληροφορίας..... | 34 |
| 3.1.6 Αποδοτικότητα φάσματος..... | 35 |
| 3.1.7 Αποδοτικότητα ισχύος..... | 35 |
| 3.2 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ | 35 |
| 3.3 ΕΙΔΗ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ / ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ | 37 |
| 3.5 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ..... | 40 |
| 4. Απόδοση FSO Συστήματος σε κανάλι ασθενών διαλείψεων | 42 |
| 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 42 |
| 4.2 ΛΟΓΑΡΙΘΜΟΚΑΝΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ | 43 |
| 4.2.1 Περιγραφή λογαριθμοκανονικής κατανομής | 43 |
| 4.2.2 Περιγραφή συναρτήσεων <i>erf</i> , <i>erfc</i> , Φ και Q | 45 |
| 4.3 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ..... | 46 |
| 4.4 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗΣ ΑΣΘΕΝΩΝ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΜΩΝ | 47 |
| 4.4.1 Κατανομή οπτικής έντασης..... | 47 |
| 4.4.2 Αθροιστική συνάρτηση κατανομής οπτικής έντασης | 49 |
| 4.4.3 Δείκτης σπινθηρισμών (<i>scintillation index-SI</i>)..... | 49 |
| 4.5 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ | 49 |

| | | |
|-------|---|----|
| 4.5.1 | Πιθανότητα Διαλείψεων..... | 49 |
| 4.5.2 | Λόγος σήματος προς θόρυβο | 50 |
| 4.5.3 | Ρυθμός σφάλματος δυαδικού ψηφίου (BER)..... | 50 |
| 5. | Αριθμητικά Αποτελέσματα..... | 52 |
| 5.1 | ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ | 52 |
| 5.1.2 | <i>Mathematica</i> | 52 |
| 5.1.3 | <i>Origin</i> | 55 |
| 5.2 | ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ..... | 56 |
| 6. | Επίλογος..... | 67 |
| 6.1 | ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ..... | 67 |
| 6.2 | ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ | 68 |
| | Βιβλιογραφία..... | 70 |
| | Ευρετήριο..... | 72 |
| | Γλωσσάρι..... | 77 |

Πίνακας Σχημάτων

| | |
|--|----|
| Σχήμα 2.1: Πομποδέκτης FSO ζεύξης(Wikipedia.org/FSO)..... | 16 |
| Σχήμα 2.2: Κύρια τμήματα οπτικής επικοινωνίας με ζεύξεις laser | 17 |
| Σχήμα 2.3: Αρχιτεκτονικές FSO συστημάτων (Τσάλας 2003)..... | 19 |
| Σχήμα 2.4 : Χρήση FSO για σύνδεση κτιρίων..... | 20 |
| Σχήμα 2.5 : Παρέκκλιση της δέσμης laser όταν η διατομή είναι μικρότερη από τις ανομοιογένειες (Τόφης 2009) | 22 |
| Σχήμα 2.6 : Παρέκκλιση της δέσμης laser όταν η διατομή είναι μεγαλύτερη από τις ανομοιογένειες (Τόφης 2009) | 22 |
| Σχήμα 2.7 : Παρέκκλιση της δέσμης laser με συνδυασμό μεγέθους διατομών (Τόφης 2009).23 | |
| Σχήμα 2.8 : Εξασθένηση ακτινοβολίας laser σε σχέση με το μήκος κύματος..... | 27 |
| Σχήμα 2.9 : Σκέδαση Rayleigh και Mie (hyperphysics.phy)..... | 28 |
| Σχήμα 2.10 : Φασματική πυκνότητα ισχύος και συνάρτηση αυτοσυσχέτισης λευκού θορύβου (Καραγιαννίδης 2009) | 31 |
| Σχήμα 3.1 : Λειτουργία laser | 36 |
| Σχήμα 3.2 : Κυματομορφή NRZ (Lambert & Casey, 1995) | 37 |
| Σχήμα 3.3 : Διαμόρφωση OOK (wara.com/article-818) | 38 |
| Σχήμα 3.4 : Κυματομορφή κωδικοποιημένη κατά Manchester (Lambert & Casey, 1995) | 39 |
| Σχήμα 3.5 : Δέκτης άμεσης ανίχνευσης(Green, 1993)..... | 40 |

| | |
|---|----|
| Σχήμα 4.1 : Γραφικές παραστάσεις της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας..... | 44 |
| Σχήμα 4.2 : Γραφικές παραστάσεις της αθροιστικής συνάρτησης κατανομής..... | 44 |
| Σχήμα 4.3: Πίνακας τιμών συνάρτησης Q..... | 46 |
| Σχήμα 4.4 : Μοντέλο FSO συστήματος | 47 |
| Σχήμα 5.1 : Περιβάλλον χρήστη Mathematica | 53 |
| Σχήμα 5.2 : Περιβάλλον χρήστη origin | 56 |
| Σχήμα 5.3 : Περιβάλλον χρήστη Mathematica και Origin | 57 |
| Σχήμα 5.4 : Πιθανότητα διαλείψεων ($\lambda=1550$, ημέρα) | 58 |
| Σχήμα 5.5 : Πιθανότητα διαλείψεων ($\lambda=1550$, νύχτα) | 59 |
| Σχήμα 5.6 : Μέσο BER σε συνάρτηση με το μέσο ηλεκτρικό SNR ($\lambda=1550$, ημέρα)..... | 60 |
| Σχήμα 5.7 : Μέσο BER σε συνάρτηση με το μέσο ηλεκτρικό SNR ($\lambda=1550$, νύχτα)..... | 61 |
| Σχήμα 5.8 : Πιθανότητα διαλείψεων ($\lambda=850$, ημέρα) | 61 |
| Σχήμα 5.9 : Πιθανότητα διαλείψεων ($\lambda=850$, νύχτα)..... | 62 |
| Σχήμα 5.10 : Μέσο BER σε συνάρτηση με το μέσο ηλεκτρικό SNR ($\lambda=850$, ημέρα)..... | 62 |
| Σχήμα 5.11 : Μέσο BER σε συνάρτηση με το μέσο ηλεκτρικό SNR ($\lambda=850$, νύχτα)..... | 63 |
| Σχήμα 5.12 : Πιθανότητα διαλείψεων (ημέρα) με $F_T=10\text{dB}$ | 64 |
| Σχήμα 5.13 : Πιθανότητα διαλείψεων (νύχτα) με $F_T=10\text{dB}$ | 64 |
| Σχήμα 5.14 : Πιθανότητα διαλείψεων (ημέρα) με $F_T=15\text{dB}$ | 65 |
| Σχήμα 5.15 : Πιθανότητα διαλείψεων (νύχτα) με $F_T=15\text{dB}$ | 65 |
| Σχήμα 5.16 : Δείκτης σπινθηρισμών κατά την διάρκεια της ημέρας..... | 66 |
| Σχήμα 5.17 : Δείκτης σπινθηρισμών κατά την διάρκεια της νύχτας..... | 66 |

1

1. Πρόλογος

1.1 Εισαγωγή

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη των επίγειων οπτικών συστημάτων ελεύθερου χώρου σε περιβάλλον με διαλείψεις μικρής έντασης. Οι οπτικές επικοινωνίες ελεύθερου χώρου (Free Space Optics-FSO), ή όπως επίσης λέγονται φωτονική ελεύθερου χώρου (Free Space Photonics-FSP) και οπτικές ασύρματες επικοινωνίες (optical wireless communications), αναφέρονται στη μετάδοση τηλεπικοινωνιακών σημάτων στην ατμόσφαιρα, μέσω διαμορφωμένων δεσμών laser με μήκη κύματος κυρίως των 850nm και 1550 nm. Τα συστήματα αυτά έχουν εκτενή εφαρμογή ειδικότερα για την επικοινωνία μεταξύ κτιρίων που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση, σε συνδέσεις μεταξύ τοπικών δικτύων (Local Area Network-LAN-to-LAN) και μητροπολιτικών δικτύων (Metropolitan Area Networks-MANs), σε συστήματα επικοινωνίας μεταξύ δορυφόρων, στο εσωτερικό κτηρίων και αεροπλάνων, σε νοσοκομεία και σε συστήματα laser radar. Σε αυτό συντελούν οι υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης που προσφέρουν τα FSO συστήματα (1 Mbps – 2.5 Gbps), όπως επίσης η μεγάλη ασφάλεια και η αξιοπιστία στην επικοινωνία. Επιπρόσθετα, ένα από τα πιο βασικά χαρακτηριστικά των συστημάτων αυτών είναι ότι λειτουργούν σε περιοχές συχνοτήτων που δεν είναι επίσημα δεσμευμένες και δεν απαιτούν άδεια χρήσης όπως τα συνήθη ασύρματα συστήματα ραδιοσυχνοτήτων (radio-frequency systems). Κατά τα τελευταία 40 χρόνια, τα συστήματα FSO χρησιμοποιήθηκαν κυρίως σε στρατιωτικές εφαρμογές. Ωστόσο, τελευταία έχουν προταθεί για να δώσουν λύση στη μεταφορά μεγάλου όγκου δεδομένων από σημείο σε σημείο όπου παρόμοιες τεχνικές όπως είναι οι οπτικές ίνες αδυνατούν να χρησιμοποιηθούν είτε λόγω κόστους εγκατάστασης είτε λόγω έλλειψης υποδομών.

Παρόλα αυτά, υπάρχουν διάφοροι παράγοντες που περιορίζουν τη λειτουργία τους. Βασική προϋπόθεση είναι η εξασφάλιση οπτικής επαφής (line of sight) μεταξύ πομπού και δέκτη, και ο ακριβής συγχρονισμός τους. Επίσης, τα διάφορα ατμοσφαιρικά φαινόμενα (π.χ. χιόνι, βροχή, ομίχλη) οι σκεδάσεις, οι στροβιλισμοί-δίνες (turbulence) όπως και διάφορες άλλες πηγές θορύβου μπορούν να μειώσουν αρκετά την απόδοση και να διακόψουν την ζεύξη. Ιδιαίτερα σημαντική είναι η επίδραση των στροβιλισμών οι οποίες προκαλούν την εμφάνιση διαλείψεων στην ένταση των οπτικών σημάτων.

Σ' αυτή την εργασία θα περιγράψουμε τα χαρακτηριστικά ενός ασύρματου οπτικού καναλιού με διαλείψεις μικρής έντασης (small scale fading) και θα μελετήσουμε την απόδοσή του χρησιμοποιώντας κατάλληλους δείκτες. Οι διαλείψεις μικρής έντασης των οπτικών σημάτων μοντελοποιούνται σε ικανοποιητικό βαθμό με την λογαριθμοκανονική (log-normal) κατανομή. Αρχικά γίνεται μια εκτενής περιγραφή και ανάλυση της λογαριθμοκανονικής κατανομής. Θεωρούμε ότι το οπτικό σύστημα λειτουργεί με διαμόρφωση έντασης και άμεσης ανίχνευσης (Intensity Modulation/Direct Detection– IM/DD) με OOK (On-Off Keying). Η διαμόρφωση αυτή χρησιμοποιείται ευρέως σε ενσύρματα οπτικά συστήματα εξαιτίας της απλότητας του τρόπου λειτουργίας και της δομής των πομποδεκτών.

Η μελέτη της απόδοσης γίνεται με την εξαγωγή αναλυτικών εκφράσεων του δείκτη διακύμανσης σπινθηρισμών (scintillation index-SI), της πιθανότητας διαλείψεων (probability of fade) και του ρυθμού σφάλματος δυαδικού ψηφίου (bit-error rate-BER). Παρουσιάζονται επίσης κατάλληλα διαγράμματα με τις παραπάνω εκφράσεις για διάφορες χαρακτηριστικές περιπτώσεις συγκεκριμένων διαύλων. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν μπορούν να αποτελέσουν ένα χρήσιμο βοήθημα για την κατανόηση του τρόπου λειτουργίας των FSO συστημάτων και την εφαρμογή τους στην πράξη.

1.2 Δομή εργασίας

Η εργασία αυτή χωρίζεται σε δύο (2) μέρη:

1. το θεωρητικό (κεφάλαια 2, 3) όπου γίνεται μία συνοπτική περιγραφή των παραμέτρων που αφορούν τη μελέτη και σχεδίαση ενός οπτικού συστήματος επικοινωνίας με laser και
2. το πρακτικό (κεφάλαιο 4,5) όπου γίνεται η κυρίως μελέτη και παράθεση των αριθμητικών αποτελεσμάτων με τη μορφή κατάλληλων σχημάτων.

Πιο συγκεκριμένα,

Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται μια περιγραφή των FSO καναλιών και των κύριων τμημάτων της οπτικής επικοινωνίας με ζεύξεις laser. Επίσης, γίνεται αναφορά των αρχιτεκτονικών των FSO συστημάτων και των σημαντικότερων παραγόντων που επηρεάζουν την εύρυθμη λειτουργία τους. Οι παράγοντες αυτοί αφορούν κυρίως τα ατμοσφαιρικά φαινόμενα (καιρικές συνθήκες), στροβιλισμοί, απώλειες ευθυγράμμισης, αλλά και τις διάφορες πηγές θορύβου.

Στο Κεφάλαιο 3 αναφέρουμε τα σημαντικότερα κριτήρια αξιολόγησης των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων τα οποία επίσης βρίσκουν εφαρμογή και στην μελέτη της απόδοσης των FSO συστημάτων. Παρατίθενται επίσης οι σημαντικότερες τεχνικές ψηφιακής διαμόρφωσης που έχουν προταθεί προς χρήση σε ασύρματα οπτικά συστήματα στην πράξη.

Στο Κεφάλαιο 4 εξετάζουμε το μοντέλο συστήματος FSO με IM/DD και OOK το οποίο χρησιμοποιείται εκτενώς στην πράξη. Περιγράφεται η δομή του πομπού και δέκτη και εξετάζεται η απόδοσή του σε κανάλι με ασθενείς στροβιλισμούς και προσθετικό λευκό θόρυβο. Στην συνέχεια αναλύουμε το λογαριθμοκανονικό μοντέλο στροβιλισμών, κάνοντας αναφορά στη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του, στην αθροιστική συνάρτηση κατανομής, στη διακύμανση σπινθηρισμών, στο BER, κλπ. Τα κριτήρια αυτά εκφράζονται με αναλυτικές μαθηματικές εκφράσεις.

Στο Κεφάλαιο 5 παραθέτουμε αριθμητικά αποτελέσματα του μοντέλου που μελετήσαμε χρησιμοποιώντας κατάλληλα δισδιάστατα και τρισδιάστατα σχήματα, για συγκεκριμένες παραμέτρους (π.χ. μήκος κύματος, απόστασης ζεύξης) που χρησιμοποιούνται σε υπάρχοντα υλοποιήσιμα ασύρματα οπτικά συστήματα. Τα παραπάνω αποτελέσματα επαληθεύουν τις μαθηματικές εκφράσεις που αναπτύξαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Για κάθε σχήμα παρατίθεται σύντομα σχόλια. Γίνεται επίσης συνοπτική περιγραφή των μαθηματικών λογισμικών πακέτων που χρησιμοποιήσαμε για την εξαγωγή των αριθμητικών αποτελεσμάτων.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 6 αναφέρουμε συνοπτικά τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάλυση μας και προτείνουμε μελλοντικές επεκτάσεις για τη βελτίωση της επίδοσης των συστημάτων που μελετήσαμε.

1.3 Ευχαριστίες

Κλείνοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα καθηγητή της εργασίας μου κ. Χαρίλαο Σανδαλίδη, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου αυτή την εργασία, για την καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκειά της και κυρίως για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα ενδιαφέρον αντικείμενο.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή κ. Αλετρά Αντώνιο και την καθηγήτρια κα Αδάμ Μαρία, ως μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στους φίλους μου, οι οποίοι μου συμπαραστάθηκαν όλο αυτό τον καιρό. Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου για την ηθική και οικονομική συμπαράσταση όχι μόνο κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της πτυχιακής μου εργασίας αλλά και καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

2

2. Τεχνολογία Συστημάτων FSO

2.1 Αρχή λειτουργίας

Η αρχή λειτουργίας των επίγειων ασύρματων οπτικών συστημάτων στηρίζεται στην εκπομπή διαμορφωμένων ακτίνων laser, από έναν πομπό προς ένα δέκτη, μέσω της ατμόσφαιρας, τηρώντας κατάλληλες προδιαγραφές ασφάλειας. Ο δέκτης αποτελείται από ένα τηλεσκόπιο συλλογής, όπου τα οπτικά σήματα που λαμβάνονται εστιάζονται σε ιδιαίτερα ευαίσθητους ανιχνευτές φωτονίων. Οι ακτίνες λέιζερ μεταφέρουν σε ψηφιακή μορφή σήματα πληροφορίας που μπορεί να είναι δεδομένα διαδικτύου, τηλεοπτική εικόνα, ηχητικά σήματα, κλπ. Για να μεταδοθούν τα σήματα με διαμορφωμένες δέσμες, απαιτείται η οπτική επαφή πομπού-δέκτη. Τα συστήματα FSO μπορούν να καλύψουν αποστάσεις μερικών χιλιομέτρων, ανάλογα με την εκπεμπόμενη ισχύ της δέσμης του laser, το χρησιμοποιούμενο μήκος κύματος ακτινοβολίας laser και τις ατμοσφαιρικές και μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούν [1].

Ένα πλεονέκτημα της χρησιμοποίησης συστημάτων FSO είναι ότι δεν απαιτείται ειδική αδειοδότηση, όπως αντίθετα συμβαίνει στη συμβατική τεχνολογία των ραδιοεπικοινωνιών. Παράλληλα, τα συστήματα αυτά μπορούν να μεταφέρουν δεδομένα υψηλού ρυθμού, κατάλληλα για ευρυζωνικές υπηρεσίες. Χάρη στην FSO τεχνολογία η μετάδοση των δεδομένων μεταξύ του πομπού και του δέκτη είναι πλήρης αμφίδρομη (full-duplex), δηλαδή μπορούν να διαβιβάσουν και να λάβουν σήματα laser μέσω της ατμόσφαιρας. Τοποθετούνται, συνήθως, σε κτήρια που έχουν οπτική επαφή χωρίς να απαιτείται οπτική καλωδίωση μεταξύ τους [2].

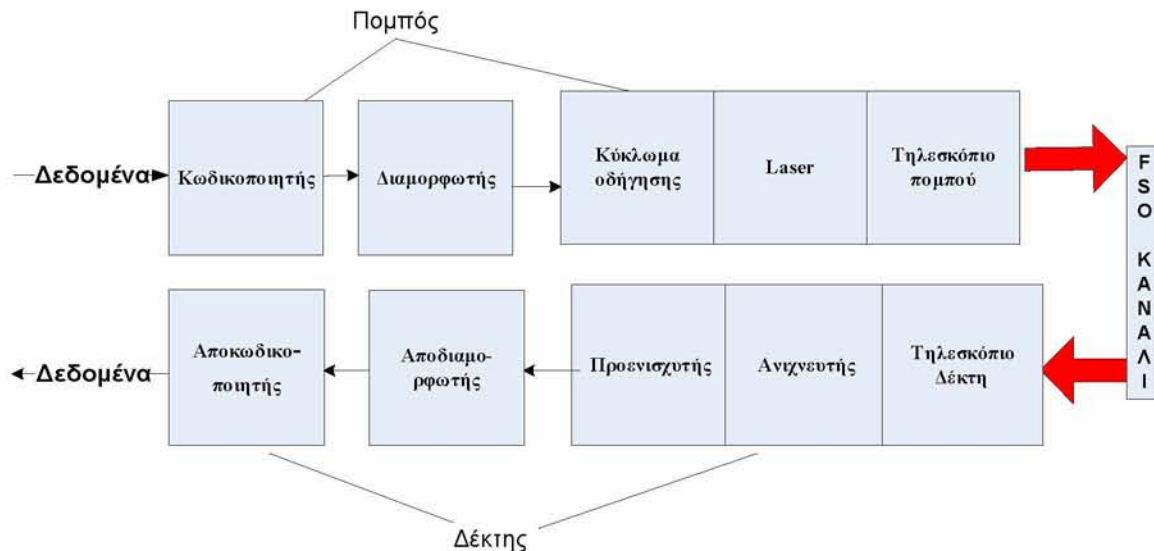
Τα συμβατικά FSO συστήματα που χρησιμοποιούνται στην πράξη έχουν συνήθως μήκος κύματος ίσο με 850 ή 1550 nm. Στις περιοχές αυτές, η μετάδοση laser παρέχει σχετική ασφάλεια στους ανθρώπινους οργανισμούς όπου είναι μεγαλύτερη κατά 50 φορές στα 1550 nm. Αυτό συμβαίνει διότι οι ακτίνες λέιζερ με μήκη κύματος στο φάσμα από 400 έως 1400 nm εκπέμπουν φως που περνάει μέσα από τον κερατοειδή και το φακό και εστιάζεται πάνω σε ένα μικρό σημείο πάνω στον αμφιβληστροειδή, ενώ τα μήκη κύματος άνω των 1400 nm απορροφάται από τον κερατοειδή και το φακό, και δεν επικεντρώνεται πάνω στο αμφιβληστροειδή [2]. Στο Σχήμα 2.1, βλέπουμε έναν πομποδέκτη ο οποίος αποτελείται από 8 δέσμες laser, ρυθμού μετάδοσης 1Gbit/s για απόσταση περίπου 2 km. Οι 8 πομποί laser βρίσκονται δεξιά και αριστερά από ένα μεγάλο πιάτο που είναι ο δέκτης ενώ παράλληλα υπάρχει και σύστημα που βοηθάει στην ευθυγράμμιση του πομποδέκτη ώστε να υπάρχει πάντα οπτική επαφή μεταξύ τους[3].



Σχήμα 2.1: Πομποδέκτης FSO ζεύξης(Wikipedia.org/FSO)

2.2 Βασική Δομή

Στο Σχήμα 2.2, παρουσιάζονται τα κύρια τμήματα ενός συστήματος οπτικής επικοινωνίας με ζεύξεις laser.



Σχήμα 2.2: Κύρια τμήματα οπτικής επικοινωνίας με ζεύξεις laser

Στο σχήμα αυτό, ο πομπός (transmitter) και ο δέκτης (receiver) θεωρούνται σαν ξεχωριστά συστήματα. Βασική αποστολή του πομπού είναι η προετοιμασία και η διαμόρφωση του σήματος πληροφορίας, ώστε να έρθει στην κατάλληλη μορφή και να έχει αυξημένη αντοχή για να μπορεί να ανταπεξέλθει στον θόρυβο και στην παραμόρφωση που δημιουργεί το ασύρματο οπτικό κανάλι. Καθώς εισέρχονται τα δεδομένα πληροφορίας, κωδικοποιούνται στον κωδικοποιητή και διαμορφώνονται στον διαμορφωτή. Επιπλέον ο πομπός ρυθμίζει τον τρόπο που αποστέλλεται η πληροφορία λαμβάνοντας υπόψη σχετικές προδιαγραφές μετάδοσης. Συνοπτικά τα κυριότερα τμήματα του πομπού είναι:

- **Κωδικοποιητής:** Λαμβάνει και κωδικοποιεί την πληροφορία που είναι μια ακολουθία από bits με σκοπό την ανίχνευση και την διόρθωση λαθών στον δέκτη. Με την κωδικοποίηση αυξάνεται η αντοχή του συστήματος στον θόρυβο, στις διαλείψεις μικρής έντασης και στην παραμόρφωση του καναλιού ή σε άλλες αρνητικές επιδράσεις.
- **Διαμορφωτής (Modulator)** Διαμορφώνει το ηλεκτρικό ψηφιακό σήμα για την προσαρμογή του στα χαρακτηριστικά του καναλιού.

2. Τεχνολογία Συστημάτων FSO

- Κύκλωμα οδήγησης (Driver): Μετατρέπει το ηλεκτρικό σε οπτικό σήμα.
- Laser: Χρησιμοποιείται για να εκπέμψει το οπτικό σήμα.
- Τηλεσκόπιο πομπού: Τηλεσκόπιο εκπομπής δέσμης laser.

Σκοπός του δέκτη είναι να ανακτήσει το οπτικό σήμα που μεταδίδεται στο κανάλι με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη αξιοπιστία και λιγότερα λάθη. Ο δέκτης αποτελείται από λειτουργικές μονάδες που πραγματοποιούν τις αντίστροφες διαδικασίες από αυτές του πομπού.

Τα τμήματα ενός δέκτη είναι:

- Τηλεσκόπιο δέκτη: Τηλεσκόπιο λήψης του οπτικού σήματος.
- Ανιχνευτής (Detector): ανιχνεύει το οπτικό σήμα και το μετατρέπει σε ηλεκτρικό. Οι πιο συνηθισμένοι ανιχνευτές είναι δίοδοι PIN (πυριτίου) ή APD (χιονοστιβάδας).
- Προενισχυτής (Preamp): ενισχύει το σήμα ώστε να αξιοποιηθεί περαιτέρω.
- Αποδιαμορφωτής (Demodulator) : Αποδιαμορφώνει το ηλεκτρικό σήμα
- Αποκωδικοποιητής: Αποκωδικοποιεί το σήμα για την ανάκτηση της πληροφορίας. Πραγματοποιεί δηλαδή την ακριβώς αντίστροφη διαδικασία με αυτήν του κωδικοποιητή του πομπού. Ανάλογα με τον τύπο της πληροφορίας μετατρέπει ή όχι τα bits σε αναλογικό σήμα [4].

2.3 Βασικές Αρχιτεκτονικές

Υπάρχουν τέσσερις βασικές αρχιτεκτονικές εγκατάστασης ενός δικτύου οπτικής επικοινωνίας ελευθέρου χώρου[5]:

- από σημείο σε σημείο (point to point)
- πλέγμα ή δίκτυο (mesh)
- δαχτυλίδι (ring)
- από σημείο σε πολλά σημεία (point to multipoint)

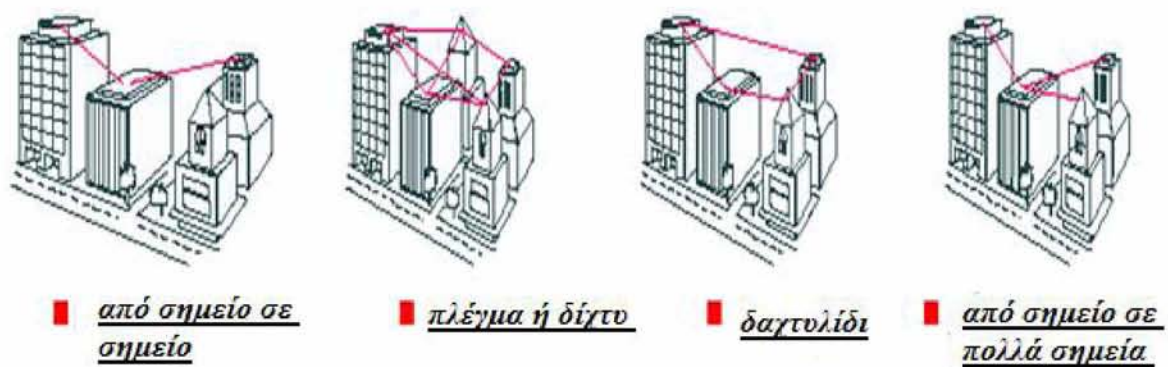
Από σημείο σε σημείο

Υπάρχει καθορισμένη σύνδεση με οπτική επαφή (clear line of sight) μεταξύ δύο κτηρίων. Είναι ο πιο απλός τύπος σύνδεσης. Αν κοπεί μία ζεύξη επηρεάζεται μόνο αυτή και όχι οι υπόλοιπες.

Πλέγμα

2. Τεχνολογία Συστημάτων FSO

Το κάθε κτήριο του δικτύου συνδέεται με την αρχιτεκτονική από σημείο σε σημείο με κάθε άλλο κτήριο. Χρησιμοποιείται κυρίως σε πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές, για μεταφορά μεγάλου όγκου δεδομένων. Όταν ο αριθμός των κτηρίων είναι δύο τότε έχουμε περίπτωση αρχιτεκτονικής από σημείο σε σημείο, αν είναι τρία τότε έχουμε περίπτωση αρχιτεκτονικής δαχτυλιδιού. Η αρχιτεκτονική αυτή αν και παρέχει μεγάλη ασφάλεια έχει μεγάλη δυσκολία και κόστος εγκατάστασης λόγω των πολλών οπτικών ζεύξεων που χρησιμοποιούνται.



Σχήμα 2.3: Αρχιτεκτονικές FSO συστημάτων (Τσάλας 2003)

Δαχτυλίδι

Όλα τα κτίρια συνδέονται συνεχόμενα σε σχήμα δαχτυλιδιού. Κάθε κτίριο συνδέεται με την αρχιτεκτονική από σημείο σε σημείο μόνο με τα δύο 2 γειτονικά του και με κανένα άλλο. Η αρχιτεκτονική αυτή παρέχει ευκολία εγκατάστασης. Ωστόσο, αν διακοπεί σε κάποιο σημείο η επικοινωνία, και σπάσει το δαχτυλίδι, είναι πιθανή η κατάρρευση του δικτύου.

Από σημείο σε πολλά σημεία

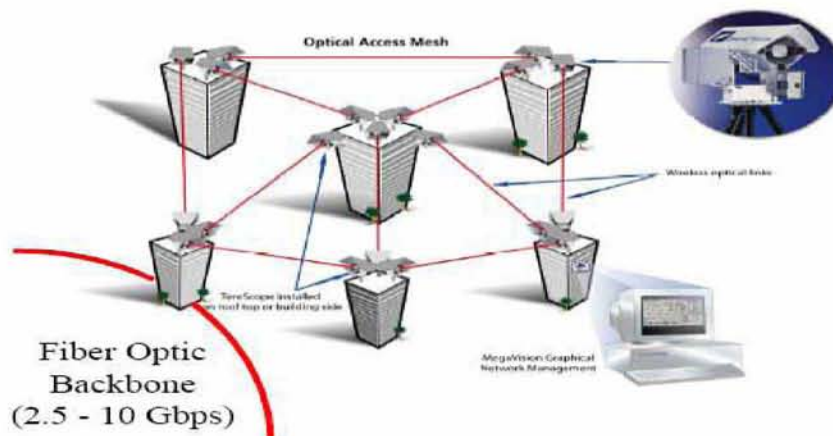
Σύνδεση δηλαδή από σημείο σε σημείο μεταξύ ενός κεντρικού κτιρίου και όλων των άλλων κτιρίων του δικτύου. Εφαρμόζεται κυρίως όταν υπάρχει οπτική επαφή μεταξύ του κεντρικού κτιρίου και των υπόλοιπων κτιρίων του δικτύου ώστε τα δεδομένα να στέλνονται χωρίς προβλήματα και λάθη. Εξασφαλίζει σχετικά μεγάλη αυτοδυναμία..

2.4 Πλεονεκτήματα - Περιορισμοί

2.4.1 Πλεονεκτήματα

Στις μέρες μας, το παγκόσμιο δίκτυο τηλεπικοινωνιών στηρίζεται στη χρήση οπτικών ινών και δικτύων μητροπολιτικής περιοχής (MANs). Εντωμεταξύ, τα δίκτυα τοπικής περιοχής (LANs) επεκτείνονται και αυτά με πολύ γρήγορο ρυθμό. Προκειμένου να μπορεί να αξιοποιηθεί η μεγάλη γκάμα των νέων διαθέσιμων υπηρεσιών, οι σχεδιαστές των δικτύων θα πρέπει να παρέχουν αποδοτικά και οικονομικά μέσα μετάδοσης προς τους χρήστες. Κατά συνέπεια, υπάρχει επιτακτική ανάγκη για δικτύωση υψηλού εύρους μεταξύ των LANs και MANs. Τα συστήματα οπτικής μετάδοσης FSO αποτελούν μια από τις πιο ελπιδοφόρες τεχνικές, γιατί προσφέρουν μία ευέλικτη λύση δικτύωσης που παρέχει σχεδόν απεριόριστο εύρος ζώνης, χαμηλό κόστος και μεγάλη ευκολία εγκατάστασης και αναβάθμισης.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, για την ανάπτυξη των συστημάτων FSO δεν απαιτείται αδειοδότηση. Η απόδοσή τους δεν επηρεάζεται από τις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Παράλληλα τα συστήματα αυτά παρέχουν μεγάλη αξιοπιστία στην επικοινωνία. Αν και για τα ασύρματα συστήματα η κοινή αντίληψη είναι ότι προσφέρουν λιγότερη ασφάλεια από ότι τα ενσύρματα, τα συστήματα FSO είναι περισσότερο ασφαλή από οποιοδήποτε άλλη τεχνολογία. Αυτό συμβαίνει διότι οι ακτίνες λέιζερ που παράγονται είναι πολύ στενές, αόρατες, έχουν υψηλή κατευθυντικότητα και έτσι είναι δύσκολο να ανιχνευθούν [2], [6].



Σχήμα 2.4 : Χρήση FSO για σύνδεση κτιρίων

2.4.2 Μειονεκτήματα-Περιορισμοί

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το πολύ μεγάλο εύρος ζώνης των FSO συστημάτων επικοινωνίας αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα. Υπάρχουν, ωστόσο, και μερικά μειονεκτήματα. Συγκεκριμένα, η ανάγκη οπτικής επαφής περιορίζει τα συστήματα κυρίως σε point to point εφαρμογές. Τυχόν αποκλίσεις της οπτικής δέσμης μπορεί να επιφέρει διακοπές στην επικοινωνία. Παράλληλα, τα συστήματα FSO αν και παρέχουν ασφάλεια και ευκολία στην εγκατάσταση, επηρεάζονται από διάφορα ατμοσφαιρικά φαινόμενα. Η μετάδοση των σημάτων γίνεται διαμέσω της ατμόσφαιρας, όπου κάτω από ορισμένες συνθήκες προκαλούν ισχυρότατες εξασθενίσεις στην ένταση των οπτικών σημάτων. Αυτό επηρεάζει σημαντικά την εύρυθμη λειτουργία των συστημάτων αυτών. Παρακάτω περιγράφονται αναλυτικά οι κυριότερες παρενέργειες που επιφέρει το ασύρματο οπτικό κανάλι διάδοσης [1], [2].

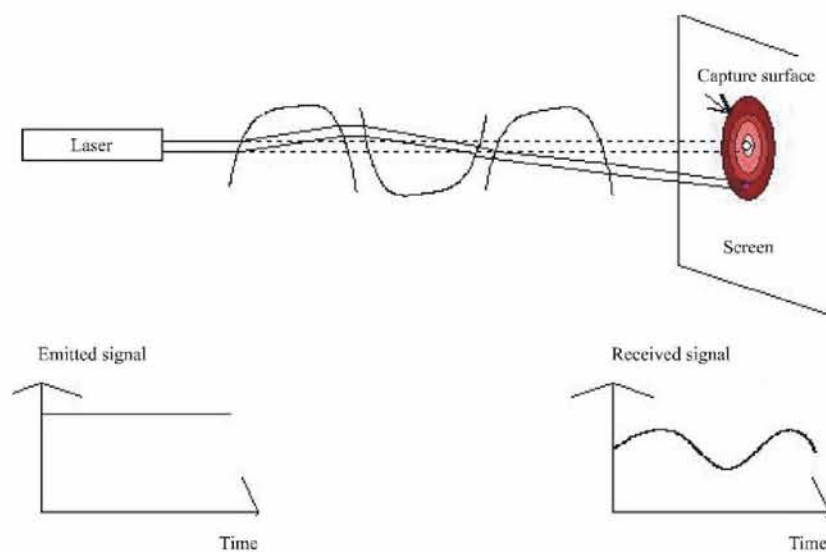
2.5 Χαρακτηριστικά ασύρματου οπτικού καναλιού

2.5.1 Ατμοσφαιρικοί σπινθηρισμοί (scintillations)

Το φαινόμενο των στροβιλισμών επηρεάζει αρνητικά τις επιδόσεις των συστημάτων FSO. Σύμφωνα με το φαινόμενο αυτό δημιουργούνται διακυμάνσεις της θερμοκρασίας και πίεσης μεταξύ των διαφόρων επιπέδων του αέρα, από το θερμό αέρα που προέρχεται από τη γη ή από κτηριακές κατασκευές λόγω των αγωγών θέρμανσης και των κλιματιστικών. Αυτές έχουν ως συνέπεια τη δημιουργία διακυμάνσεων στο δείκτη διάθλασης, οι οποίες επιφέρουν στη συνέχεια διακυμάνσεις στην οπτική ένταση, που συχνά αποκαλούνται οπτικοί στροβιλισμοί - δίνες (optical turbulence).

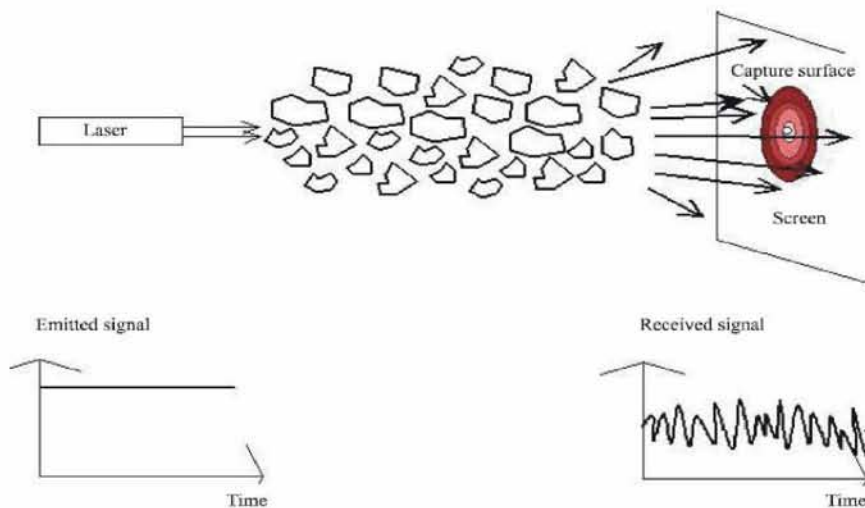
Οι διακυμάνσεις που οφείλονται στους οπτικούς στροβιλισμούς γίνονται αισθητές με τη μορφή σπινθηρισμών (scintillations) και αποτελούν έναν από τους κύριους λόγους διάλειψης (*fading*) των οπτικών σημάτων. Στη φύση, μια παρόμοια διακύμανση της φωτεινής έντασης που μπορούμε να δούμε με το γυμνό μάτι εκδηλώνεται κατά την διάρκεια που ένα αστέρι πέφτει. Στα παρακάτω σχήματα φαίνεται πως μπορούν να δημιουργηθούν αυτές οι παρεμβολές και οι διακυμάνσεις στα λαμβανόμενα σήματα με αποτέλεσμα το φαινόμενο των ατμοσφαιρικών σπινθηρισμών.

Στο Σχήμα 2.5 βλέπουμε πως παρεκκλίνει η δέσμη laser όταν η διατομή της δέσμης είναι πολύ μικρότερη σε σύγκριση με τις ανομοιογένειες [1][7].



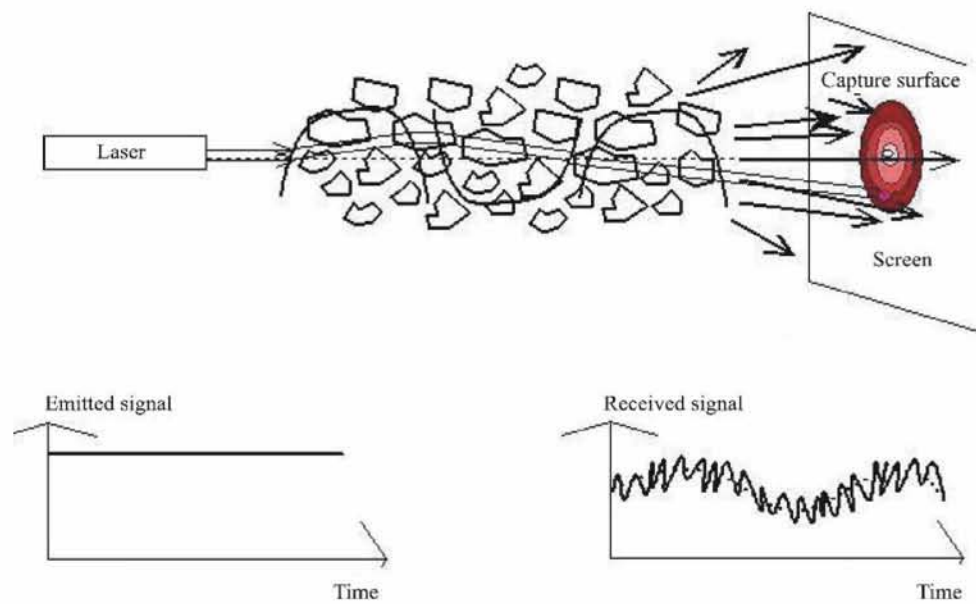
Σχήμα 2.5 : Παρέκκλιση της δέσμης laser όταν η διατομή είναι μικρότερη από τις ανομοιογένειες (Τόφης 2009)

Το Σχήμα 2.6 δείχνει πως παρεκκλίνει η δέσμη laser όταν η διατομή της δέσμης είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με τις ανομοιογένειες.



Σχήμα 2.6 : Παρέκκλιση της δέσμης laser όταν η διατομή είναι μεγαλύτερη από τις ανομοιογένειες (Τόφης 2009)

Και στο Σχήμα 2.7 βλέπουμε πως με τον συνδυασμό των δυο προηγούμενων ανομοιογενειών προκαλούνται οι ατμοσφαιρικοί σπινθηρισμοί.



Σχήμα 2.7 : Παρέκκλιση της δέσμης laser με συνδυασμό μεγέθους διατομών (Τόφης 2009)

2.5.2 Καιρικές συνθήκες

- Ομίχλη

Η εμφάνιση πυκνής ομίχλης, συνθήκη δηλαδή όπου η ορατότητα κυμαίνεται μεταξύ 0 - 2km επηρεάζει σημαντικά τα συστήματα FSO. Η ομίχλη αποτελείται από σταγονίδια νερού, τα οποία είναι μερικές εκατοντάδες μικρά σε διάμετρο, αλλά μπορούν να τροποποιήσουν το φως ή να παρεμποδίσουν τη διέλευση του σε συνδυασμό με την απορρόφηση, τη σκέδαση, και τους σπινθηρισμούς. Η πυκνότητα της ομίχλης μεταβάλλεται από ύψος σε ύψος και αυτό δυσχεραίνει το πρόβλημα και καθιστά δύσκολη την επίλυση του [1].

- Βροχή

Η βροχή έχει μικρή επίδραση στα συστήματα FSO. Αυτό συμβαίνει διότι η ακτίνα των σταγόνων της βροχής (200-2000μm) είναι αρκετά μεγαλύτερη από το μήκος κύματος των οπτικών σημάτων που χρησιμοποιούνται. Η επίδραση της εξαρτάται από το ύψος της βροχής και από την απόσταση διάδοσης του οπτικού σήματος. Η λειτουργία των συστημάτων επικοινωνίας επηρεάζεται ωστόσο από ισχυρές βροχοπτώσεις που ξεπερνούν τα 10 cm/hour.

- Χιόνι

Το χιόνι δεν δημιουργεί γενικά ισχυρές εξασθενίσεις στην μετάδοση των σημάτων. Ωστόσο, το μέγεθος και το σχήμα των νιφάδων ποικίλλει. Τις περισσότερες φορές είναι μεγαλύτερο

από αυτό των σταγόνων της βροχής, άρα και μεγαλύτερο από το μήκος κύματος των σημάτων που χρησιμοποιούνται.

2.5.3 Τοποθέτηση πομπού-δέκτη

Η μικρή διατομή της δέσμης laser που χρησιμοποιείται στα συστήματα FSO επιβάλλει την απόλυτη ευθυγράμμιση μεταξύ πομπού και δέκτη. Οποιαδήποτε δραστηριότητα επηρεάσει την ευθυγράμμιση αυτή προκαλεί συγχρόνως πιθανή απώλεια σήματος. Αν και η εγκατάσταση ενός ασύρματου οπτικού συστήματος είναι αρκετά εύκολη υπόθεση, παρόλα αυτά πρέπει να είμαστε ιδιαίτερα προσεκτικοί ώστε η τοποθέτηση του πομπού και του δέκτη να τηρεί κάποιες βασικές προϋποθέσεις για να μην επηρεάζεται η εύρυθμη λειτουργία του καναλιού, και για την ασφάλεια των ανθρώπινων οργανισμών. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να δοθεί προσοχή στα παρακάτω [12]:

- *Οπτική επαφή:* ο πιο κύριος παράγοντας για την σωστή λειτουργία ενός ασύρματου οπτικού καναλιού, είναι η οπτική επαφή του πομπού και του δέκτη. Πρέπει δηλαδή κατά την εγκατάσταση να αποφεύγεται η ύπαρξη οποιουδήποτε εμποδίου ανάμεσά τους.
- *Επιφάνεια στερέωσης:* Ο πομποδέκτης πρέπει να τοποθετείται σε τέτοιο σημείο, όπου θα υπάρχει ελάχιστη έως μηδαμινή πιθανότητα μετατόπισης του εξοπλισμού. Δηλαδή, η βάση του τηλεσκοπίου πρέπει να τοποθετείται σε σταθερό μέρος, ώστε να μην είναι εκτεθειμένη σε ανέμους και φυσικά εμπόδια.
- *Ακριβής μέτρηση της απόστασης:* Ένας ακόμη παράγοντας που θα πρέπει να ληφθεί υπόψη, είναι η απόσταση μεταξύ του πομπού και του δέκτη. Πειραματικές μετρήσεις έχουν δείξει ότι μπορεί να επιτευχθεί ταχύτητα ζεύξης 125 Mbps σε αποστάσεις ως 8 km.
- *Προσανατολισμός Ανατολής-Δύσης:* Βασική προϋπόθεση επίσης είναι η αποφυγή τοποθέτησης των πομποδεκτών κατά τον προσανατολισμό Ανατολής-Δύσης γιατί πέφτει περισσότερο φως στην ενεργό επιφάνεια του ενισχυτή και αυτό μπορεί να προκαλέσει διακοπή της επικοινωνίας του καναλιού.

- *Προστασία Ματιών*: το σημείο εγκατάστασης που θα επιλέξουμε θα πρέπει να είναι τέτοιο ώστε τα τηλεσκόπια να τοποθετούνται αρκετά ψηλά, για να εξασφαλίζεται η ασφάλεια και να μην υπάρχει η παραμικρή περίπτωση έκθεσης των απόμων απευθείας στα μάτια.

2.5.4 Φυσικά εμπόδια

Μεταξύ πομπού και δέκτη πρέπει να αποφεύγονται τα διάφορα φυσικά εμπόδια όπως τα δέντρα. Κι αυτό γιατί όπως είναι λογικό με την πάροδο του χρόνου τα φυλλώματα των δέντρων πυκνώνουν κι έτσι μπορούν να προκαλέσουν σοβαρές εξασθενίσεις του σήματος. Επίσης, πτηνά ή μεγάλοι γερανοί που κατασκευάζουν κτήρια μπορούν να μπλοκάρουν προσωρινά τη λειτουργία ενός συστήματος FSO [1].

2.5.5 Σεισμική δραστηριότητα

Η κίνηση των κτηρίων κατά την διάρκεια μιας σεισμικής δόνησης μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στην εύρυθμη λειτουργία και την ευθυγράμμιση μεταξύ του πομπού και του δέκτη και κατ' επέκταση να διακόψει την οπτική επαφή μεταξύ τους [1].

2.5.6 Ατμοσφαιρική εξασθένηση της ισχύος ακτινοβολίας laser

Τα μόρια του οξυγόνου και του αζώτου από τα οποία αποτελείται η καθαρή ατμόσφαιρα σε συνδυασμό με τους υδρατμούς, το διοξείδιο του άνθρακα και άλλα αιωρούμενα στερεά σωματίδια συμβάλλουν στην εξασθένηση των μεταδιδόμενων οπτικών σημάτων μέσω δύο μηχανισμών :

- της απορρόφησης που εμφανίζεται όταν αιωρούμενα μόρια νερού στην επίγεια ατμόσφαιρα επηρεάζουν τα φωτόνια και
- της σκέδασης, όπου προκαλείται όταν το μήκος κύματος προσκρούει είτε με σταγόνες βροχής, χαλαζιού ή νερού λόγω ομίχλης στην ατμόσφαιρα, είτε με μόρια στερεών σωματιδίων [1].

Η εξασθένηση της ισχύος ακτινοβολίας laser, όταν αυτή διέρχεται διαμέσου της ατμόσφαιρας, περιγράφεται από τον εκθετικό νόμο Beers–Lambert [6]:

$$\tau(R) = \frac{P(R)}{P(0)} = e^{-\sigma R}, \quad (2.1)$$

2. Τεχνολογία Συστημάτων FSO

όπου

- $P(R)$: η ισχύς laser σε απόσταση R
- $P(0)$: η ισχύς εκπομπής της πηγής
- σ : ο συνολικός συντελεστής εξασθένησης (ανά μονάδα μήκους κύματος).

Στα συστήματα FSO χρησιμοποιείται κυρίως η λογαριθμική κλίμακα, εκφρασμένη σε db, και περιγράφει την απόδοση σε συνάρτηση με το λόγο της ισχύος που εκπέμπεται P_T προς την ισχύ που λαμβάνεται P_R , δηλαδή:

$$\text{db} = 10 \log (P_T / P_R) . \quad (2.2)$$

Μία ποσοτική περιγραφή της προκύπτουσας εξασθένησης των οπτικών σημάτων λόγω των φαινομένων της απορρόφησης και της σκέδασης σε συνάρτηση πάντα της απόστασης μετάδοσής τους x , είναι η εξής:

$$\frac{I_R}{I_0} = \exp(-\gamma x), \quad (2.3)$$

όπου

- $\frac{I_R}{I_0}$: ο λόγος της έντασης του ανιχνευόμενου οπτικού σήματος προς την ένταση του εκπεμπόμενου σήματος
- γ : ο συνολικός συντελεστής εξασθένησης.

Ο συντελεστής εξασθένησης ορίζεται ως:

$$\gamma = \alpha_m + \alpha_a + \beta_m + \beta_a, \quad (2.4)$$

όπου

- α_m : Ο συντελεστής σκέδασης λόγω των φαινομένων της βροχής, της ομίχλης, του χιονιού
- α_a : Ο συντελεστής σκέδασης λόγω παρουσίας λεπτών αιωρούμενων στερεών σωματιδίων στην ατμόσφαιρα
- β_m : Ο συντελεστής απορρόφησης λόγω των μορίων των ατμοσφαιρικών αερίων

- β_a : Ο συντελεστής απορρόφησης λόγω των λεπτών στερεών αιωρούμενων σωματιδίων.

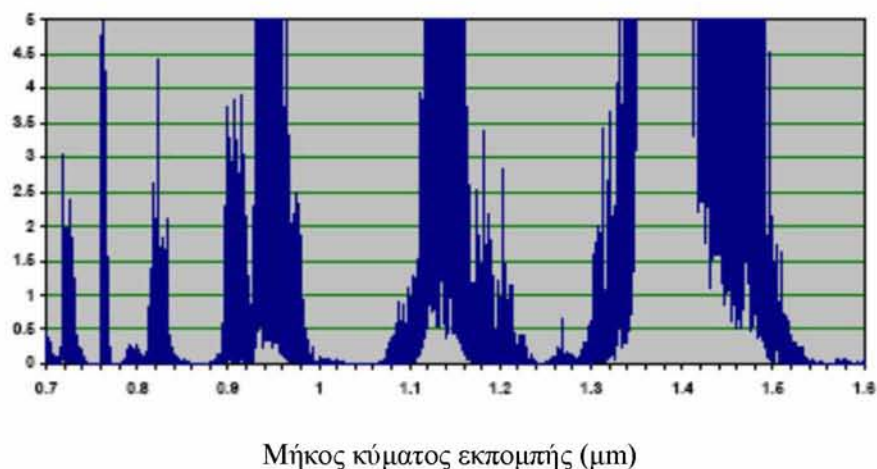
Οι πιο συνηθισμένες τιμές μήκους κύματος για τα ασύρματα οπτικά συστήματα με laser είναι τα 850 nm και τα 1550 nm. Τα συγκεκριμένα μήκη κύματος επιλέγονται να είναι στις περιοχές φάσματος όπου η εξασθένηση (db/km) παίρνει τη μικρότερη τιμή (Σχήμα 2.8). Στις περιοχές αυτές η συνεισφορά της απορρόφησης στον συνολικό συντελεστή εξασθένησης είναι παρά πολύ μικρές. Για το λόγο αυτό, η συνεισφορά της σκέδασης αποτελεί κυρίαρχο ρόλο στον συντελεστή συνολικής εξασθένησης. Η σκέδαση μπορεί να περιγραφεί από τον τύπο:

$$a = \frac{2\pi r}{\lambda}, \quad (2.5)$$

όπου r είναι η ακτίνα του σκεδαζόμενου σωματιδίου και λ το μήκος κύματος [6].

Εξασθένηση

(db/km)



Σχήμα 2.8 : Εξασθένηση ακτινοβολίας laser σε σχέση με το μήκος κύματος.

Υπάρχουν διαφορές σκεδάσεις ανάλογα με το μέγεθος των ατμοσφαιρικών σωματιδίων σε σχέση με το μήκος κύματος.

1. Κατά την διάρκεια που τα ατμοσφαιρικά σωματίδια είναι πολύ μικρότερα από το χρησιμοποιούμενο μήκος κύματος, τότε δημιουργείται η λεγόμενη σκέδαση Rayleigh. Για τα συγκεκριμένα μήκη κύματος των 850 nm και 1550 nm, η σκέδαση Rayleigh οφείλεται κυρίως στα μόρια της ατμόσφαιρας και η επίδρασή της στο συνολικό

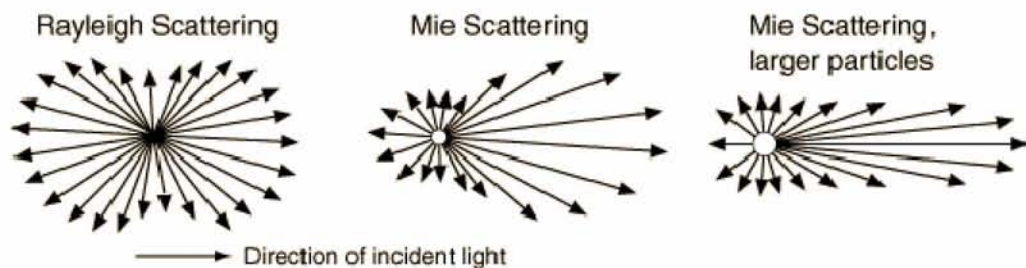
συντελεστή εξασθένησης, είναι σχετικά μικρή. Ο συντελεστής απόσβεσης λόγω της σκέδασης Rayleigh είναι:

$$\beta_m(\lambda) = \frac{24\pi^3}{\rho\lambda^4} 10^3 \left(\frac{[n(\lambda)]^2 - 1}{[n(\lambda)]^2 + 2} \right) \left(\frac{6 + 3\delta}{6 - 7\delta} \right), \quad (2.6)$$

όπου:

- $\beta_m(\lambda)$: ο μοριακός συντελεστής σκέδασης Rayleigh (Km^{-1})
- λ : μήκος κύματος (μm)
- ρ : μοριακή πυκνότητα (m^{-3})
- δ : συντελεστής αποπόλωσης του αέρα ~ 0.03
- $n(\lambda)$: συντελεστής διάθλασης του αέρα

2. Όταν τα ατμοσφαιρικά σωματίδια έχουν παρόμοιο μέγεθος με αυτό του μήκους κύματος, τότε έχουμε την λεγόμενη σκέδαση Mie. Στην περίπτωση αυτή, η σκέδαση είναι μεγαλύτερη στην εμπρόσθια κατεύθυνση[8].



Σχήμα 2.9 : Σκέδαση Rayleigh και Mie (hyperphysics.phy)

Αυτό το φαινόμενο αποτελεί τον πιο περιοριστικό παράγοντα για ανάπτυξη των FSO σε μεγάλες αποστάσεις. Στην οπτική περιοχή, το φαινόμενο αυτό προκαλείται κυρίως από υδρονέφωση και ομίχλη. Η εξασθένιση μπορεί να φτάσει τα 300dB/km σε αντίθεση με την περιοχή μηκών κύματος της τάξης των mm, όπου η εξασθένιση είναι τυπικά μερικά dB/Km. Ο συντελεστής εξασθένησης λόγω της σκέδασης Mie είναι:

$$\beta_n(\lambda) = 10^5 \int_0^\infty Q_d \left(\frac{2\pi r}{\lambda}, n' \right) \pi r^2 \frac{dN(r)}{dr} dr, \quad (2.7)$$

όπου

- $\beta_n(\lambda)$: ο μοριακός συντελεστής σκέδασης Mie (Km^{-1})
- λ : μήκος κύματος (μm)
- $\frac{dN(r)}{dr}$: η κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων ανά μονάδα όγκου (cm^{-4})
- n' : το πραγματικό μέρος του συντελεστή ανάκλασης, n , του θεωρούμενου σωματιδίου
- r : ακτίνα των σωματιδίων (cm)
- $Q_d\left(\frac{2\pi r}{\lambda}, n'\right)$: διατομή σκέδασης για δεδομένο τύπο σωματιδίου

3. Στην περίπτωση που τα ατμοσφαιρικά σωματίδια είναι πολύ μεγαλύτερα από το μήκος κύματος τότε έχουμε το φαινόμενο της γεωμετρικής σκέδασης. Κατά την διάρκεια του φαινομένου αυτού, οι σταγόνες της βροχής, το χιόνι, τα σύννεφα και οι ισχυρές ομίχλες σκεδάζουν γεωμετρικά την προσπίπτουσα δέσμη laser.

2.5.7 Πηγές Θορύβου

Εκτός από τα διάφορα ατμοσφαιρικά φαινόμενα, την εύρυθμη λειτουργία και τις επιδόσεις των FSO συστημάτων μπορούν να επηρεάσουν και διαφορές πηγες θορύβου. Αυτές μοντελοποιούνται σαν Gaussian τυχαίες μεταβλητές με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά που είναι η μέση τιμή και η διακύμανση. Παρακάτω αναφέρονται συνοπτικά τα σημαντικότερα είδη θορύβου που μπορούν να έχουν επίδραση στα συστήματα που μελετάμε.

2.5.7.1 Θερμικός Θόρυβος

Ο θερμικός θόρυβος (Johnson–Nyquist noise) οφείλεται στα ηλεκτρικά κυκλώματα του δέκτη και μπορεί να προκαλέσει ισχυρότατες εξασθενίσεις στα FSO συστήματα. Είναι λευκός και μοντελοποιείται σαν μία Gaussian τυχαία μεταβλητή με μέση τιμή μηδέν και διακύμανση που δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_{th}^2 = \frac{2kT_r N_0 t}{R_L e^2}, \quad (2.8)$$

όπου

- k : Η σταθερά Boltzmann ($k=1,380\ 6504 \times 10^{-23} \text{ JxK}^{-1} = 8,617343 \times 10^{-5} \text{ eVxK}^{-1}$)

2. Τεχνολογία Συστημάτων FSO

- T_r : Η θερμοκρασία θορύβου του δέκτη
- R_L : Η αντίσταση φορτίου του δέκτη
- e : Το φορτίο του ηλεκτρονίου
- t : Ο χρόνος εκπομπής

2.5.7.2 Σκοτεινό Ρεύμα Ανιχνευτή

Το σκοτεινό ρεύμα του φωτοανιχνευτή, αντιπροσωπεύει το μέγεθος του ρεύματος εξόδου, όταν απουσιάζει το οπτικό σήμα εισόδου συμβάλλοντας στο συνολικό θόρυβο του συστήματος. Μοντελοποιείται επίσης σαν μια Gaussian τυχαία μεταβλητή με μέση τιμή και διακύμανση που δίνεται από:

$$m_d = \frac{i_d t}{e}, \quad (2.10)$$

όπου

- i_d : Η μέση τιμή του σκοτεινού ρεύματος φωτοανίχνευσης
- e : Το φορτίο του ηλεκτρονίου.
- t : Ο χρόνος εκπομπής

2.5.7.3 Φως Περιβάλλοντος

Η πηγή θορύβου αυτή προέρχεται από την ηλιακή ακτινοβολία που ανιχνεύεται από τη φωτοδίοδο του δέκτη. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας έχει κι εδώ Gaussian μορφή με μέση τιμή και διακύμανση που δίνονται από την παρακάτω σχέση:

$$m_d = \frac{n I_b A_d t}{h f}, \quad (2.11)$$

όπου

- I_b : Η φασματική πυκνότητα ισχύος του φωτός του περιβάλλοντος
- A_d : Η επιφάνεια ανίχνευσης του φωτοανιχνευτή
- n : Η κβαντική αποδοτικότητα του φωτοανιχνευτή
- t : Ο χρόνος εκπομπής

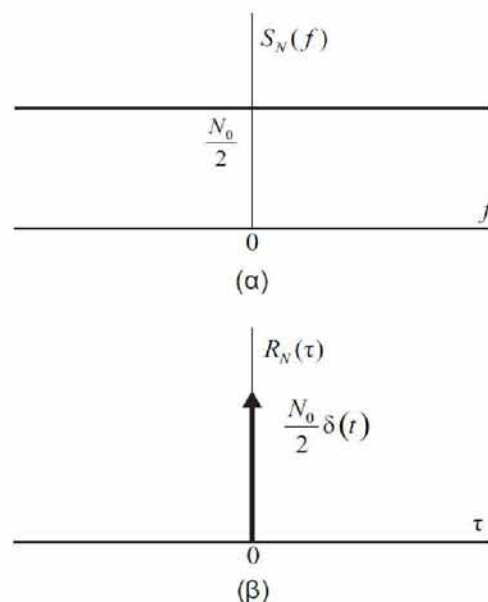
- h : Η σταθερά του Planck (Η σταθερά του Planck, $h \approx 6,626 \times 10^{-34} Js$ καθορίζει το ελάχιστο όριο δράσης στο σύμπαν.)
- f : Η συχνότητα του ανιχνευόμενου οπτικού σήματος.

2.5.7.4 Λευκός θόρυβος

Όλα τα παραπάνω ήδη θορύβου προσεγγίζονται με το μοντέλο του προσθετικού λευκού Γκαουσιανού θορύβου (Additive White Gaussian Noise – AWGN). Ο λευκός θόρυβος έχει επίπεδο φάσμα, δηλαδή η φασματική πυκνότητα ισχύος έχει σταθερή τιμή σε μια πολύ μεγάλη περιοχή συχνοτήτων. Η φασματική πυκνότητα ισχύος του λευκού θορύβου $N(f)$ δίνεται από την σχέση :

$$S_N(f) = \frac{N_0}{2}, f \in (-\infty, +\infty), \quad (2.9)$$

όπου $N_0 = kT$ και T η θερμοκρασία της αντίστασης σε Kelvin. Η φασματική πυκνότητα δείχνει το πώς κατανέμεται το φάσμα του σήματος σε σχέση με τις συχνότητες. Στο παρακάτω σχήμα εικονίζεται η φασματική πυκνότητα και η αυτοσυσχέτιση του λευκού θορύβου [9].



Σχήμα 2.10 : Φασματική πυκνότητα ισχύος και συνάρτηση αυτοσυσχέτισης λευκού θορύβου
(Καραγιαννίδης 2009)

3

3. Κριτήρια Επίδοσης Ασύρματων Οπτικών Συστημάτων

3.1 Κριτήρια αξιολόγησης

Η αξιολόγηση ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος είναι ένα δύσκολο και πολυδιάστατο ζήτημα καθώς η απόδοσή του επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες που ποικίλλουν ανάλογα με την εφαρμογή. Στη βιβλιογραφία έχουν αναφερθεί πολλά κριτήρια αξιολόγησης τα όποια προσπαθούν να εκτιμήσουν την απόδοση των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων είτε μέσω της εφαρμογής τους σε πραγματικό χρόνο είτε μέσω του εκ των προτέρων σχεδιασμού τους. Παρακάτω αναλύονται μερικά από τα πιο βασικά κριτήρια.

3.1.1 Λόγος Σήματος προς Θόρυβο (SNR)

Το πιο κοινό και κατανοητό κριτήριο αξιολόγησης ενός συστήματος επικοινωνίας αποτελεί ο λόγος σήματος-προς-θόρυβο (signal-to-noise ratio - SNR). Συχνά αυτός μετράται κατά την έξοδο του δέκτη και συνεπώς έχει άμεση σχέση με τα δεδομένα της ίδιας της διαδικασίας ανίχνευσης. Από τα διάφορα πιθανά μέτρα απόδοσης που υπάρχουν, είναι συνήθως το πιο εύκολο στην εκτίμηση και συχνά χρησιμεύει ως ένας εξαιρετικός δείκτης της συνολικής απόδοσης του συστήματος. Ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος του λαμβανομένου σήματος P_r , ως προς την ισχύ του θορύβου N_0 [9]:

$$SNR = \frac{P_r}{N_0}. \quad (3.1)$$

Επίσης μπορεί να οριστεί ως

$$SNR = \frac{(P_s R_d)^2}{N_0 B}, \quad (3.2)$$

όπου

- P_s : η απαιτούμενη ισχύς σήματος σε Watts
- R_d : η ευαισθησία ανίχνευσης του δέκτη σε A/W
- N_0 : η πυκνότητα φάσματος ισχύος θορύβου σε A^2/Hz
- B : το εύρος ζώνης του δέκτη σε Hz.

Ο παρακάτω ορισμός αφορά το στιγμιαίο SNR δηλαδή το λόγο της στιγμιαίας ισχύος σήματος προς το θόρυβο. Σε περιβάλλοντα υπό την επίδραση διαλείψεων, το καταλληλότερο μέτρο είναι η μέση απόδοση του SNR (ASNR), διότι η ισχύς του λαμβανομένου σήματος είναι τυχαία μεταβλητή [9]. Αυτό δίνεται ως

$$ASNR = E[SNR]. \quad (3.3)$$

3.1.2 Λόγος σήματος προς παρεμβολή συν θόρυβο (SINR)

Ο λόγος σήματος προς παρεμβολή συν θόρυβο (Signal-to-Interference plus Noise Ratio-SINR) χρησιμοποιείται αρκετές φορές αντί του SNR διότι στην πράξη εκτός από τον θόρυβο, υπάρχουν και παρεμβολές (interference). Οι παρεμβολές αποτελούν έναν άλλο σημαντικό παράγοντα που υποβαθμίζει την ποιότητα της επικοινωνίας. Μπορούν να δημιουργηθούν είτε από χρήστες του ιδίου συστήματος είτε από άλλες πηγές (σπινθηρισμοί).

Το κριτήριο αυτό ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος P_r , ως προς το άθροισμα της ισχύος του θορύβου N_0 και των παρεμβολών P_I [9]:

$$SINR = \frac{P_r}{N_0 + P_I}, \quad (3.4)$$

Όπως και στο SNR, όταν η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος ή/και των παρεμβολών είναι τυχαία μεταβλητή χρησιμοποιούμε την μέση τιμή του SINR (ASINR).

$$ASINR = E[SINR]. \quad (3.5)$$

3.1.3 Ρυθμός σφάλματος δυαδικού ψηφίου (BER)

Ένα από τα πιο δύσκολα κριτήρια αξιολόγησης ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος αποτελεί ο ρυθμός σφάλματος δυαδικού ψηφίου (Bit error rate-BER). Πολλές φορές όταν χρησιμοποιούνται σύμβολα που αποτελούνται από περισσότερα από δυο ψηφία χρησιμοποιείται και ο ρυθμός σφάλματος συμβόλου (Symbol error rate- SER). Ο σπουδαιότερος λόγος για τη δυσκολία στην αξιολόγηση του BER έγκειται στο γεγονός ότι το BER σε κανάλια διαλείψεων είναι, κατά κανόνα μια μη γραμμική συνάρτηση του στιγμιαίου SNR.

Παρόλα αυτά όμως, αποτελεί ένα από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα κριτήρια για την φυσική απόδοση και συμπεριφορά των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων. Το BER ή SER αναφέρεται κυρίως στο παρατηρούμενο ή εκτιμώμενο θεωρητικά μέσο ποσοστό σφαλμάτων σε bits ή σύμβολα, αντίστοιχα. Παραδείγματος χάριν, αν κατά μέσο όρο σε 10^4 bits ένα λαμβάνεται με σφάλμα, τότε $BER = 10^{-4}$ [9], [10].

3.1.4 Διακοπή Επικοινωνίας

Η πιθανότητα διακοπής επικοινωνίας (outage probability - P_{out}) ορίζεται ως η πιθανότητα το λαμβανόμενο SNR να λάβει τιμή μικρότερη από μια τιμή κατωφλίου γ_t

$$P_{out} = P_r(SNR < \gamma_t). \quad (3.6)$$

Εναλλακτικά, επίσης, μπορεί να οριστεί ως η πιθανότητα ο ρυθμός μετάδοσης πληροφορίας να πάρει τιμή μικρότερη από την R_t , που απαιτείται για την αξιόπιστη επικοινωνία μεταξύ του πομπού και του δέκτη [9]

$$P_{out} = P_r(C < R_t). \quad (3.7)$$

3.1.5 Ρυθμός μετάδοσης πληροφορίας

Ο ρυθμός μετάδοσης πληροφορίας (Bit Rate) ή αλλιώς χωρητικότητα καναλιού (Channel Capacity) υπολογίζεται από την σχέση του Shannon-Hartley

$$C = W \log_2 (1 + SNR), bps \quad (3.8)$$

Όπως φαίνεται από την σχέση παραπάνω, ο ρυθμός μετάδοσης πληροφορίας εξαρτάται από το διαθέσιμο εύρος ζώνης W και από το SNR. Αυξάνεται ή μειώνεται όταν αυξάνονται ή μειώνονται αντίστοιχα κάποια από τα δυο αυτή μεγέθη [9].

3.1.6 Αποδοτικότητα φάσματος

Η αποδοτικότητα φάσματος (Bandwidth Efficiency ή Spectral Efficiency) ορίζεται ως [9] :

$$N_{BW} = \frac{R}{W}, \quad (3.9)$$

όπου

- R : ο ρυθμός εκπομπής
- W : διαθέσιμο εύρος ζώνης

3.1.7 Αποδοτικότητα ισχύος

Η αποδοτικότητα ισχύος (Power Efficiency) ορίζεται ως το SNR που απαιτείται για την επίτευξη συγκεκριμένης επίδοσης της πιθανότητας σφάλματος.

3.2 Τεχνικές διαμόρφωσης

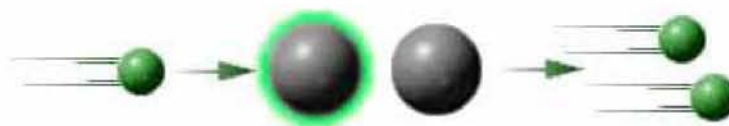
Διαμόρφωση είναι η μετατροπή του σήματος βασικής ζώνης σε ένα άλλο σήμα βασικής ή υψηλότερης ζώνης συχνοτήτων ώστε να μπορεί να μεταδοθεί στο κανάλι υπό καλύτερες συνθήκες. Για το λόγο αυτό η ανάγκη για διαμόρφωση του πληροφοριακού σήματος είναι μεγάλη και γίνεται κυρίως για τους εξής λόγους:

- *Βελτίωση της ποιότητας επικοινωνίας.*
Σε πολλές περιπτώσεις, όπως παραδείγματος χάριν στη διαμόρφωση συχνότητας, η διαμόρφωση μπορεί να προκαλέσει μεγάλη βελτίωση στην ποιότητα της επικοινωνίας, αυξάνοντας το εύρος ζώνης του διαμορφωμένου σήματος.
- *Αντιμετώπιση των περιορισμών που επιβάλλει το κανάλι.*
Μέσω της διαμόρφωσης, το σήμα μετατρέπεται σε κατάλληλη μορφή, έτσι ώστε να μπορεί να μεταδοθεί στο συγκεκριμένο εύρος ζώνης που επιβάλλει το κανάλι και όλα τα υπόλοιπα προβλήματα που δημιουργούνται από αυτό.
- *Πολυπλεξία*

Ένα μεγάλο πλεονέκτημα της διαμόρφωσης, είναι ότι μας δίνει την δυνατότητα της πολυπλεξίας, δηλαδή της ταυτόχρονης πρόσβασης πολλών χρηστών μέσα στο κανάλι [9].

Στα σύγχρονα οπτικά συστήματα ανάλογα με τον τρόπο που μπορεί επιτευχθεί η διαδικασία της διαμόρφωσης, έχουμε δύο μεγάλες κατηγορίες, την άμεση διαμόρφωση, όπου η μεταβολή της ισχύος εξόδου γίνεται με μεταβολή του ρεύματος, και την έμμεση διαμόρφωση, όπου το laser λειτουργεί συνεχώς (continuous wave), και η μεταβολή της ισχύος εξόδου γίνεται με διέλευση του φωτός από εξωτερικό διαμορφωτή. Στην περίπτωση αυτή το σήμα πληροφορίας αποτυπώνεται στην φέρουσα οπτική δέσμη εξωτερικά [11]. Εμείς θα επικεντρωθούμε στην άμεση διαμόρφωση λόγω του ότι χρησιμοποιείται από την πλειοψηφία των οπτικών σημάτων.

Στις οπτικές διαμορφώσεις οι χρησιμοποιούμενες οπτικές πηγές είναι είτε δίοδοι LED (Light Emitting Diodes) είτε δίοδοι LASER. Οι φωτοδίοδοι LED εκπέμπουν υπέρυθρες ακτίνες και χρησιμοποιούνται συνήθως σε εφαρμογές με μικρότερες αποστάσεις και με μέτριες απαιτήσεις εύρους ζώνης έως 155 Mbps. Οι πηγές laser εκπέμπουν φωτόνια και η λειτουργία τους στηρίζεται στο φαινόμενο της εξαναγκασμένης εκπομπής. Όταν ένα φωτόνιο χτυπήσει ένα ήδη διεγερμένο άτομο, το άτομο εκπέμπει ένα νέο φωτόνιο, που είναι απόλυτα όμοιο με το προσπίπτον, ίδιο μήκος κύματος και ίδια κατεύθυνση (Σχήμα 3.1). Η διαδικασία αυτή ονομάζεται εξαναγκασμένη εκπομπή.



Σχήμα 3.1 : Λειτουργία laser

Συγκεκριμένα, από ένα αρχικό φωτόνιο παράγονται δύο όμοια φωτόνια και αν αυτά χτυπήσουν νέα άτομα προκύπτουν 4 όμοια φωτόνια. Στην συνέχεια αυτά με την σειρά τους με την ίδια διαδικασία δημιουργούν μια δέσμη φωτονίων ίδιας ενέργειας, κατεύθυνσης, και φάσης. Η δέσμη αυτή είναι το γνωστό σε όλους μας laser και η διεργασία παραγωγής της λέγεται διεργασία laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation - Ενίσχυση του φωτός μέσω εξαναγκασμένης εκπομπής ακτινοβολίας). Τα βασικά χαρακτηριστικά του φωτός laser είναι τα εξής:

3. Κριτήρια Επίδοσης Ασύρματων Οπτικών Συστημάτων

- *Μονοχρωματικότητα* : τα φωτόνια της δέσμης έχουν όλα το ίδιο σχεδόν μήκος κύματος
- *Κατευθυντικότητα* : τα φωτόνια της δέσμης έχουν όλα την ίδια κατεύθυνση
- *Συμφωνία φάσης* : τα φωτόνια της δέσμης έχουν όλα την ίδια φάση
- *Μεγάλη ένταση* : πολλά φωτόνια σε μικρή επιφάνεια

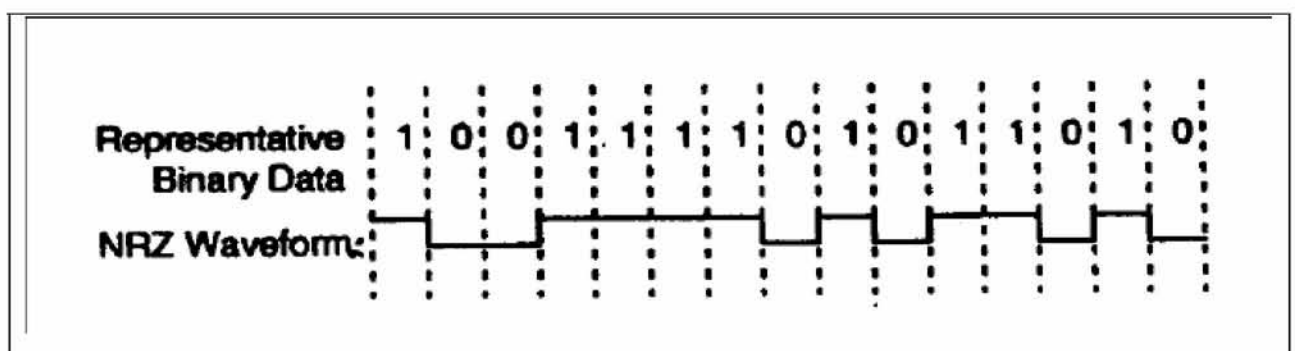
Στην άμεση διαμόρφωση παρεμβαίνουμε στη τροφοδοσία των LED και των laser με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται η ένταση (οπτική ισχύς) της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας. Για το λόγω αυτό τα οπτικά συστήματα άμεσης διαμόρφωσης είναι γνωστά και σαν συστήματα διαμόρφωσης έντασης IM (Intensity Modulation) [11].

3.3 Είδη ψηφιακής διαμόρφωσης / κωδικοποίησης

Οι τρεις σημαντικότερες τεχνικές διαμόρφωσης που χρησιμοποιούνται στα ασύρματα οπτικά συστήματα είναι η OOK (On-Off Keying), η κωδικοποίηση Manchester και η PPM (Pulse Position Modulation)[12].

OOK

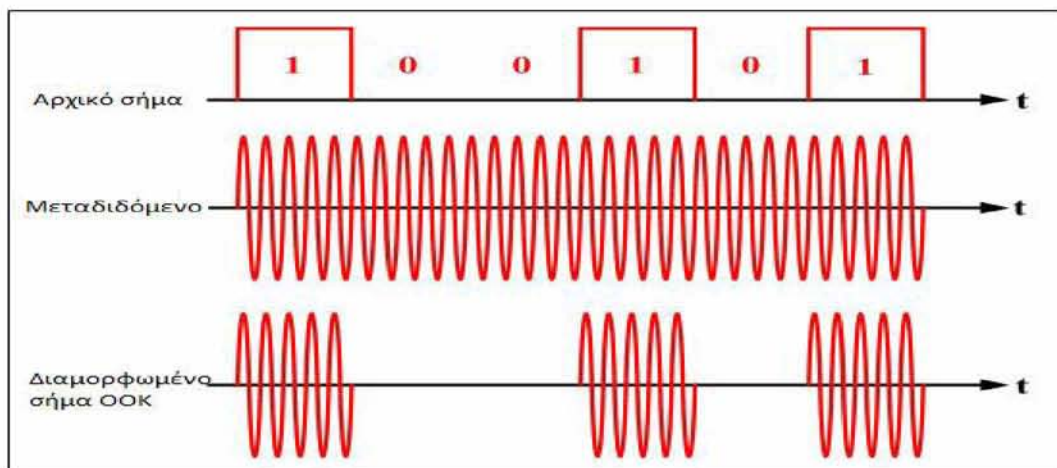
Η διαμόρφωση OOK είναι μια περίπτωση της κυματομορφής NRZ (Non Return to Zero). Στην κυματομορφή NRZ το δυαδικό “1” αναγνωρίζεται από τη παρουσία σήματος κατά τη διάρκεια ενός bit ενώ το δυαδικό “0” αναγνωρίζεται από την απουσία σήματος κατά τη διάρκεια ενός bit όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα [13][14]



Σχήμα 3.2 : Κυματομορφή NRZ (Lambert & Casey, 1995)

Στη διαμόρφωση OOK το δυαδικό “1” εμφανίζεται όταν το Laser είναι ανοιχτό και το δυαδικό “0” εμφανίζεται όταν το Laser είναι κλειστό. Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε μια διαμόρφωση OOK[14].

3. Κριτήρια Επίδοσης Ασύρματων Οπτικών Συστημάτων



Σχήμα 3.3 : Διαμόρφωση ΟΟΚ (wara.com/article-818)

Ο ρυθμός σφάλματος δυαδικού ψηφίου-BER, είναι η παράμετρος μέσω της οποίας αξιολογείται η ποιότητα του σήματος στις ασύρματες ψηφιακές οπτικές επικοινωνίες, δηλαδή η πιθανότητα να ληφθεί λανθασμένη απόφαση για κάποιο ψηφίο. Η πιθανότητα που καθορίζει το BER στη διαμόρφωση ΟΟΚ δίνεται από τον τύπο:

$$P_E = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{SNR}{2}} \right), \quad (3.10)$$

όπου η συνάρτηση σφάλματος είναι:

$$\operatorname{erfc}(X) = \frac{1}{2} - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt, \quad (3.11)$$

Δηλαδή

$$SNR = \frac{\left[P_{pk} R_d \left(1 - \frac{1}{N_e} \right) \right]}{4 N_0 B}, \quad (3.12)$$

όπου:

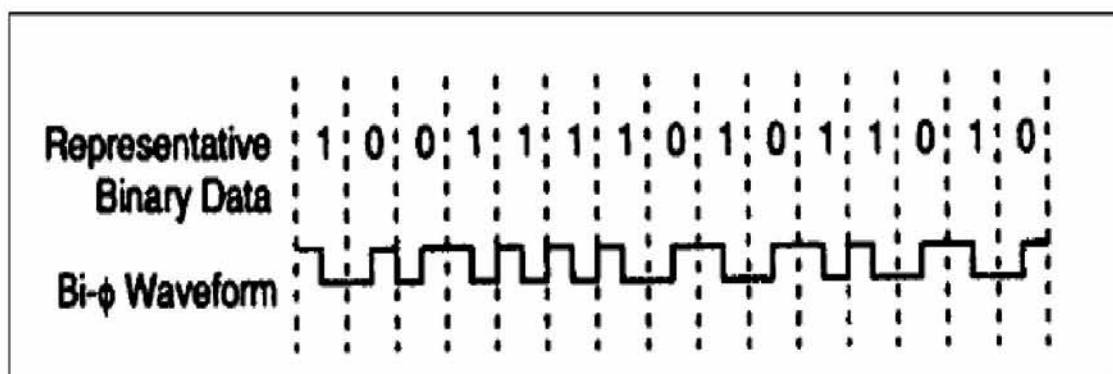
- P_{pk} : η μέγιστη ένταση οπτικής ισχύος σήματος σε Watt
- R_d : ευαισθησία ανίχνευσης $\left(\frac{A}{Hz} \right)$ (detector responsivity)
- N_e : ρυθμός απόσβεσης της πηγής (extinction ratio of the source)

3. Κριτήρια Επίδοσης Ασύρματων Οπτικών Συστημάτων

- N_0 : η πυκνότητα ισχύος θορύβου σε $\left(\frac{A^2}{Hz}\right)$
- B : εύρος ζώνης σε Hz .

Κωδικοποίηση Manchester

Μια άλλη περίπτωση της διαμόρφωσης OOK είναι η κωδικοποίηση Manchester. Σύμφωνα με αυτή, το δυαδικό “1” παριστάνεται μεταδίδοντας έναν θετικό παλμό κατά την διάρκεια του πρώτου μισού του συμβόλου, ακολουθούμενο από έναν αρνητικό παλμό στο δεύτερο μισό της διάρκειας του συμβόλου. Στο δυαδικό “0” οι παλμοί αυτοί μεταδίδονται με την αντίθετη σειρά. Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε μια κυματομορφή κωδικοποιημένη κατά Manchester [13], [14]



Σχήμα 3.4 : Κυματομορφή κωδικοποιημένη κατά Manchester (Lambert & Casey, 1995)

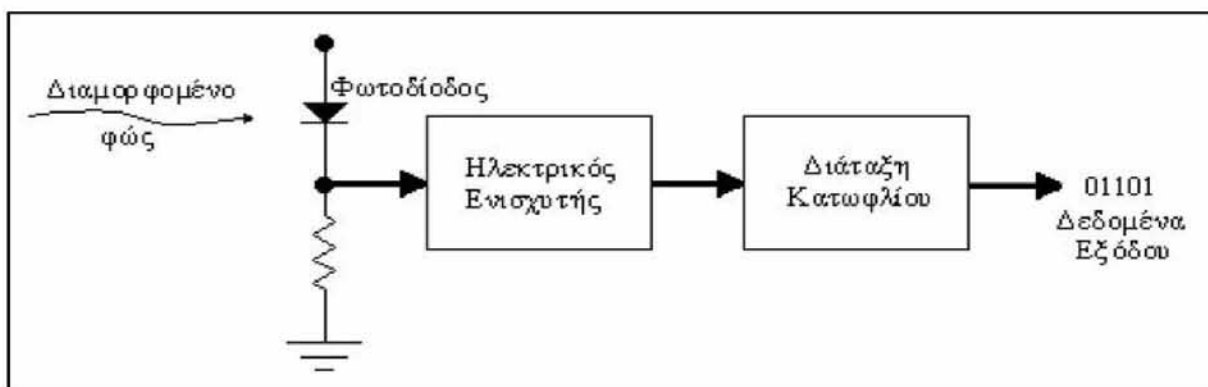
PPM

Η διαμόρφωση PPM (Pulse Position Modulation) βασίζεται στη χρονική μετακίνηση των παλμών και είναι πάρα πολύ απλή στην υλοποίησή της. Αν το bit που διαμορφώνεται είναι το 0 ο παλμός εκπέμπεται κατά χρονικό διάστημα δ νωρίτερα από τον κανονικό χρόνο αποστολής ενώ αν το bit που διαμορφώνεται είναι το 1 ο παλμός αποστέλλεται κατά χρόνο δ αργότερα.

3.5 Τεχνικές ανίχνευσης

Με τον όρο ανίχνευση εννοούμε την ανάκτηση της πληροφορίας από τον πομπό στο δέκτη. Στα ασύρματα οπτικά συστήματα η ανίχνευση περιλαμβάνει αρχικά την λήψη του οπτικού σήματος και στην συνέχεια τη μετατροπή του σε ηλεκτρικό σήμα. Έπειτα, ακολουθεί ενίσχυση και φιλτράρισμα του ηλεκτρικού αυτού σήματος ώστε να εξάγουμε την πληροφορία με την βοήθεια κάποιων συμβατικών μεθόδων αποδιαμόρφωσης. Η τεχνολογία των ανιχνευτών είναι άμεσα συνδεδεμένη με την τεχνολογία των Laser στις οπτικές επικοινωνίες.

Στις οπτικές επικοινωνίες χρησιμοποιούνται δυο τεχνικές η άμεση και η σύμφωνη ανίχνευση. Εμείς θα ασχοληθούμε κυρίως με την άμεση ανίχνευση όπου οι πιο συνηθισμένοι τύποι ανιχνευτών που χρησιμοποιούνται σ' αυτή είναι οι φωτοδιόδοι χιονοστιβάδας (avalanche photodiode-APD) και οι φωτοδιόδοι πυριτίου p-intrinsic (PIN). Στην άμεση ανίχνευση η διαμορφωμένη οπτική δέσμη προσπίπτει κατευθείαν στο φωτοδίοδο. Στην συνέχεια μετατρέπεται σε ηλεκτρικό ρεύμα όπου ενισχύεται και γίνεται προσδιορισμός του κατά πόσο το ρεύμα αυτό είναι πιο πάνω ή πιο κάτω από ένα ορισμένο κατώφλι. Μετά γίνεται ανάκτηση της πληροφορίας με κατάλληλη αποδιαμόρφωση, αναλόγως με την διαμόρφωση που είχε προηγηθεί (Σχήμα 3.5).



Σχήμα 3.5 : Δέκτης άμεσης ανίχνευσης (Green, 1993)

Οι φωτοδιόδοι PIN βασίζονται στην αντίστροφη αρχή λειτουργίας των LED's, μετατρέποντας τα φωτεινά σήματα σε ηλεκτρόνια μέσω μιας σχέσης 1:1.

Οι APD φωτοδιόδοι έχουν παρόμοια λειτουργία με τους φωτοδιόδους PIN, αλλά παρέχουν επιπλέον και τη διεργασία της ενίσχυσης, μέσω της μετατροπής ενός φωτονίου σε πολλά ηλεκτρόνια (φαινόμενο χιονοστιβάδας). Οι APD φωτοδιόδοι προσφέρουν ένα κέρδος της

3. Κριτήρια Επίδοσης Ασύρματων Οπτικών Συστημάτων

τάξης των 50 με 200, που είναι απαραίτητο για την εύρυθμη λειτουργία του δέκτη. Επίσης, προσφέρουν χαμηλό θόρυβο, μεγάλο εύρος ζώνης και μεγάλη ευαισθησία που είναι και το μεγαλύτερο πλεονέκτημα τους απέναντι των φωτοδιόδων PIN, διότι ο θόρυβος είναι μικρότερος από τον αντίστοιχο του ηλεκτρικού θερμικού θορύβου που παρουσιάζει ο ενισχυτής της PIN.

Οι PIN φωτοδιόδοι παρουσιάζουν όλα τα χαρακτηριστικά των φωτοδιόδων APD εκτός από το κέρδος χιονοστιβάδας. Το φαινόμενο της χιονοστιβάδας δεν παρουσιάζεται στις PIN φωτοδιόδους και για το λόγο αυτό οι φωτοδιόδοι PIN έχουν μοναδιαίο κέρδος. Οι φωτοδιόδοι PIN είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι ανιχνευτές ημιαγωγών σε συστήματα FSO διότι οι APD φωτοδιόδοι είναι πολύ ακριβότεροι [11][16].

4

4. Απόδοση FSO Συστήματος σε κανάλι ασθενών διαλείψεων

4.1 Εισαγωγή

Όπως αναλύθηκε και στο πρώτο μέρος της εργασίας, ένας βασικός παράγοντας που επιδρά αρνητικά στην επίδοση του ασύρματου οπτικού μας συστήματος είναι οι σπινθηρισμοί που προκαλούνται από αναταράξεις ως αποτέλεσμα της διάδοσης της δέσμης διαμέσου της ατμόσφαιρας. Ειδικότερα, οι σπινθηρισμοί, μπορούν να οδηγήσουν σε απώλεια ισχύος στον δέκτη και σε εμφάνιση διαλείψεων στο λαμβανόμενο οπτικό σήμα. Η αξιοπιστία ενός οπτικού συστήματος που λειτουργεί κάτω από τέτοιες συνθήκες, μπορεί να εξαχθεί από ένα μαθηματικό μοντέλο για την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (pdf) ενός σήματος με τυχαίες διαλείψεις.

Για την περιγραφή του μοντέλου των σπινθηρισμών στην οπτική ένταση των σημάτων έχουν προταθεί διάφορα στατιστικά μοντέλα και υπάρχει εκτενής βιβλιογραφία [14]. Ιδιαίτερα, έχει παρατηρηθεί ότι για ασθενείς σπινθηρισμούς, η διακύμανση της έντασης μοντελοποιείται ως μια λογαριθμοκανονική κατανομή. Καθώς όμως αυξάνεται οι ισχύς των σπινθηρισμών, πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν και οι πολλαπλές διακυμάνσεις που δημιουργούνται. Σ' αυτές τις περιπτώσεις, η λογαριθμοκανονική κατανομή παρουσιάζει μεγάλες αποκλίσεις σε σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα. Για ισχυρούς σπινθηρισμούς, έχει αποδειχθεί ότι το καταλληλότερο μοντέλο είναι η Κ κατανομή, διότι παρέχει μια εξαιρετική αναλογία μεταξύ των θεωρητικών και πειραματικών δεδομένων.

Στην παρούσα εργασία θα εστιάσουμε στην περιγραφή των ασθενών διαλείψεων οι οποίες περιγράφονται με το μοντέλο της λογαριθμοκανονικής κατανομής. Αρχικά, περιγράφουμε τα βασικά χαρακτηριστικά της κατανομής αυτής και στη συνέχεια θα αναφερθούμε στην μελέτη

4. Απόδοση FSO Συστήματος σε κανάλι ασθενών διαλείψεων

επιδόσεως ενός ασύρματου οπτικού συστήματος IM/DD με OOK σε κανάλι με ασθενείς διαλείψεις. Το συγκεκριμένο σύστημα χρησιμοποιείται ευρέως στην πράξη και είναι το πιο απλό στην υλοποίηση του. Για το λόγο αυτό συχνά χρησιμοποιείται ως κριτήριο σύγκρισης της απόδοσης πιο πολύπλοκων ασύρματων οπτικών συστημάτων.

4.2 Λογαριθμοκανονική κατανομή

4.2.1 Περιγραφή λογαριθμοκανονικής κατανομής

Στη θεωρία πιθανοτήτων, η λογαριθμοκανονική κατανομή είναι μια κατανομή πιθανότητας της τυχαίας μεταβλητής της οποίας ο λογάριθμος είναι κανονικά κατανεμημένος. Αν Y είναι μια τυχαία μεταβλητή με κανονική κατανομή, τότε η $X = \exp(Y)$ έχει λογαριθμοκανονική κατανομή. Ομοίως, αν το X είναι κατανεμημένο λογαριθμοκανονικά, τότε η $Y = \log(X)$ ακολουθεί κανονική κατανομή. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (probability density function - pdf) της λογαριθμοκανονικής κατανομής είναι [18] :

$$f_x(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right), x > 0, \quad (4.1)$$

όπου μ και σ είναι η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση αντίστοιχα.

Στο Σχήμα 4.1 δίνονται χαρακτηριστικές τιμές της λογαριθμοκανονικής κατανομής για διάφορες τιμές του μ και σ .

Η αθροιστική συνάρτηση κατανομής (Cumulative Distribution Function-cdf) της είναι :

$$F_x(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left[-\frac{\ln x - \mu}{\sigma\sqrt{2}}\right] = \Phi\left(\frac{\ln x - \mu}{\sigma}\right), \quad (4.2)$$

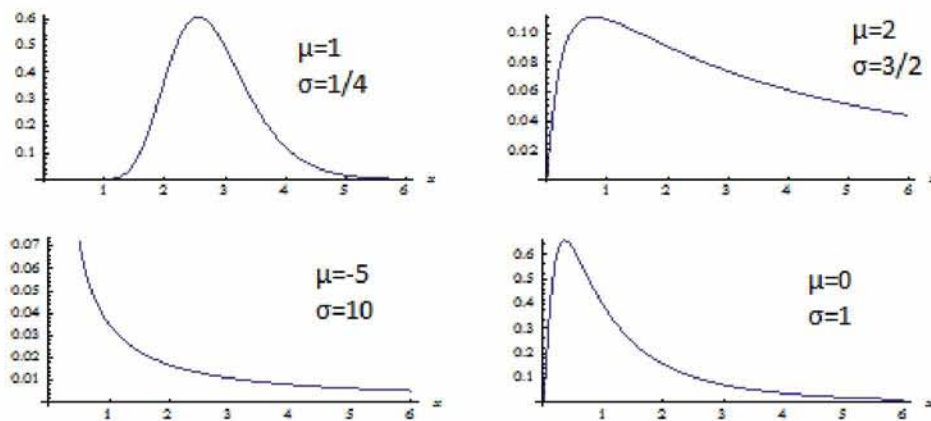
όπου

- $\operatorname{erfc}(\cdot)$: είναι η συμπληρωματική συνάρτηση σφάλματος
- $\Phi(\cdot)$: η cdf της κανονικής κατανομής

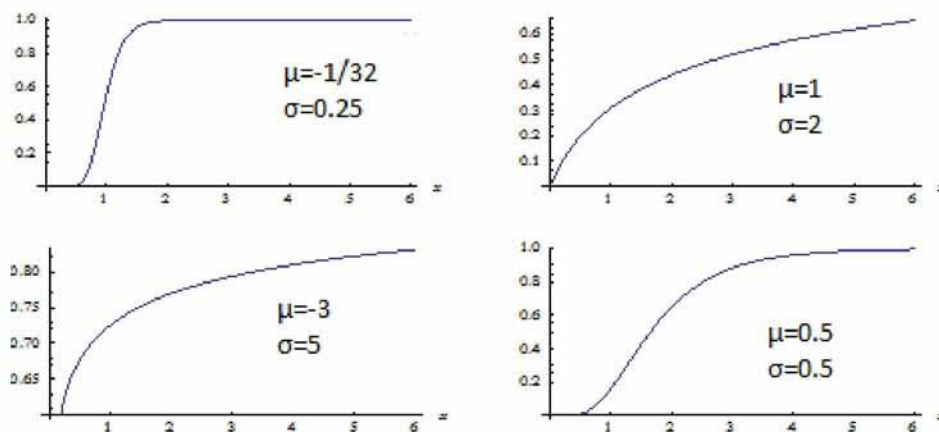
Οι παραπάνω συναρτήσεις επεξηγούνται στην παρακάτω ενότητα.

Στο Σχήμα 4.2 δίνονται γραφικές παραστάσεις της (4.2) για διάφορες τιμές του μ και σ .

4. Απόδοση FSO Συστήματος σε κανάλι ασθενών διαλείψεων



Σχήμα 4.1 : Γραφικές παραστάσεις της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας



Σχήμα 4.2 : Γραφικές παραστάσεις της αθροιστικής συνάρτησης κατανομής

Επίσης, η μέση τιμή, η διακύμανση και η τυπική απόκλιση δίνονται από τους τύπους [19]

$$E[X] = e^{\mu + \frac{1}{2}\sigma^2}, \quad (4.3)$$

$$Var[X] = (e^{\sigma^2} - 1)e^{2\mu + \sigma^2}, \quad (4.4)$$

$$s.d[X] = \sqrt{Var[X]} = \left(e^{\mu + \frac{1}{2}\sigma^2} \sqrt{e^{\sigma^2} - 1} \right). \quad (4.5)$$

4.2.2 Περιγραφή συναρτήσεων erf , erfc , Φ και Q

Συναρτήσεις erf , erfc

Η συνάρτηση σφάλματος erf , που ονομάζεται και συνάρτηση σφάλματος Gauss, εμφανίζεται στις πιθανότητες, στην στατιστική, στην επιστήμη των υλικών και σε διάφορες διαφορικές εξισώσεις. Ορίζεται ως [19]:

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt. \quad (4.6)$$

Η συμπληρωματική συνάρτηση σφάλματος, συμβολίζεται erfc και ορίζεται ως

$$\text{erfc}(x) = 1 - \text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2} dt. \quad (4.7)$$

Συνάρτηση Φ

Η αθροιστική συνάρτηση κατανομής της κανονικοποιημένης κανονικής κατανομής συμβολίζεται με το ελληνικό κεφαλαίο γράμμα Φ και μπορεί να υπολογιστεί σε συνάρτηση με την erf ως [19]:

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-t^2/2} dt = \frac{1}{2} \left[1 + \text{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{2}} \right) \right]. \quad (4.8)$$

Συνάρτηση- Q

Η συνάρτηση Q είναι μια Gaussian συνάρτηση και εκφράζει την πιθανότητα μια τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί την κανονικοποιημένη Gaussian κατανομή να λάβει τιμή μεγαλύτερη από την τιμή x και ορίζεται ως [19]:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (4.9)$$

Επίσης, συνδέεται άμεσα με την συμπληρωματική συνάρτηση σφάλματος $\text{erfc}(\cdot)$ όπου

$$\text{erfc}(x) = 2Q(2x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2} dt \quad (4.10)$$

4. Απόδοση FSO Συστήματος σε κανάλι ασθενών διαλείψεων

Μερίκες από τις τιμές που παίρνει η συνάρτηση Q δίνονται στον παρακάτω πίνακα[19]

| Στήλη1 | Στήλη2 | Στήλη3 | Στήλη4 |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| $Q(0.0) = 0.500000000$ | $Q(1.0) = 0.158655254$ | $Q(2.0) = 0.022750132$ | $Q(3.0) = 0.001349898$ |
| $Q(0.1) = 0.460172163$ | $Q(1.1) = 0.135666061$ | $Q(2.1) = 0.017864421$ | $Q(3.1) = 0.000967603$ |
| $Q(0.2) = 0.420740291$ | $Q(1.2) = 0.115069670$ | $Q(2.2) = 0.013903448$ | $Q(3.2) = 0.000687138$ |
| $Q(0.3) = 0.382088578$ | $Q(1.3) = 0.096800485$ | $Q(2.3) = 0.010724110$ | $Q(3.3) = 0.000483424$ |
| $Q(0.4) = 0.344578258$ | $Q(1.4) = 0.080756659$ | $Q(2.4) = 0.008197536$ | $Q(3.4) = 0.000336929$ |
| $Q(0.5) = 0.308537539$ | $Q(1.5) = 0.066807201$ | $Q(2.5) = 0.006209665$ | $Q(3.5) = 0.000232629$ |
| $Q(0.6) = 0.274253118$ | $Q(1.6) = 0.054799292$ | $Q(2.6) = 0.004661188$ | $Q(3.6) = 0.000159109$ |
| $Q(0.7) = 0.241963652$ | $Q(1.7) = 0.044565463$ | $Q(2.7) = 0.003466974$ | $Q(3.7) = 0.000107800$ |
| $Q(0.8) = 0.211855399$ | $Q(1.8) = 0.035930319$ | $Q(2.8) = 0.002555130$ | $Q(3.8) = 0.000072348$ |
| $Q(0.9) = 0.184060125$ | $Q(1.9) = 0.028716560$ | $Q(2.9) = 0.001865813$ | $Q(3.9) = 0.000048096$ |

Σχήμα 4.3: Πίνακας τιμών συνάρτησης Q

4.3 Μοντελοποίηση συστήματος

Θεωρούμε ένα επίγειο FSO σύστημα που χρησιμοποιεί διαμόρφωση IM/DD με OOK. Ένα τυπικό διάγραμμα μιας FSO σύνδεσης επικοινωνίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.4.

Ο πομπός περιλαμβάνει μια πηγή φωτός, δηλαδή ένα λέιζερ ημιαγωγών με ευρύ εύρος ζώνης και υψηλής ισχύος και ένα τηλεσκόπιο. Τα διαμορφωμένα οπτικά σήματα διαδίδονται κατά μήκος μιας οριζόντιας διαδρομής και υπόκεινται σε ασθενείς διαταραχές και στροβιλισμούς (turbulence) που ακολουθούν λογαριθμοκανονική κατανομή. Η επίδραση των άλλων φαινομένων που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2 αν και σημαντική δεν λαμβάνεται υπόψη γιατί μας ενδιαφέρει να εξετάσουμε μόνο τη συνεισφορά του φαινομένου των στροβιλισμών στην διάδοση των σημάτων.

Ο δέκτης συλλέγει το οπτικό σήμα και αποτελείται από δίοδο PIN ή APD. Ο λόγος σήματος προς θόρυβο επηρεάζεται κυρίως από θόρυβο βολής ο οποίος προκαλείται από την ύπαρξη φωτός που υπάρχει στο περιβάλλον και από τον ηλεκτρικό θερμικό θόρυβο. Ο θόρυβος αυτός μοντελοποιείται γενικά ως λευκός προσθετικός Γκαουσιανός θόρυβος και είναι ανεξάρτητος από το σήμα λέιζερ. Υπό αυτές τις συνθήκες το σήμα εξόδου περιγράφεται ως

$$y = sx + n = \eta Ix + n, \quad (4.11)$$

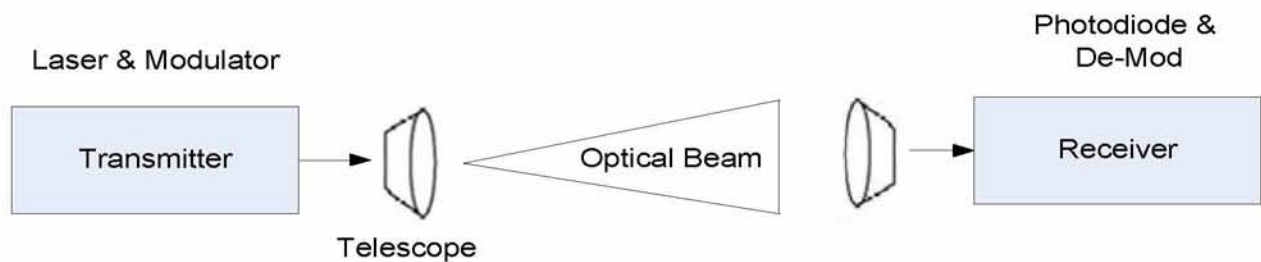
όπου

- I : είναι η λαμβανόμενη κανονικοποιημένη ένταση,

4. Απόδοση FSO Συστήματος σε κανάλι ασθενών διαλείψεων

- x : είναι το διαμορφωμένο σήμα OOK το οποίο είναι 0 ή 1,
- $s = \eta I$,
- n : είναι ο λευκός προσθετικός Γκαουσιανός θόρυβος (AWGN) με μηδενική μέση τιμή και ισχύ θορύβου N_0 ,
- η : σταθερά λόγου μετατροπής φωτός σε ηλεκτρικό ρεύμα που δίνεται από

$$\eta = \gamma \frac{e\lambda}{h_p c}, \quad (4.12)$$



Σχήμα 4.4 : Μοντέλο FSO συστήματος

όπου

- γ : η κβαντοποιημένη αποδοτικότητα του οπτικού δέκτη
- e : το φορτίο του ηλεκτρονίου
- λ : το μήκος κύματος του σήματος
- h_p : σταθερά του Plank και
- c : η ταχύτητα του φωτός.

Στην παρούσα μελέτη η διάμετρος του οπτικού δέκτη θεωρείται πάρα πολύ μικρή και προσεγγίζει το σημείο. Παράλληλα θεωρούμε ότι ο δέκτης γνωρίζει την κατάσταση του καναλιού (perfect channel state information).

4.4 Κριτήρια περιγραφής ασθενών σπινθηρισμών

4.4.1 Κατανομή οπτικής έντασης

Στην περίπτωση που το κανάλι χαρακτηρίζεται από ασθενείς σπινθηρισμούς, η διακύμανση της έντασης του οπτικού σήματος μοντελοποιείται στοχαστικά ως μια λογαριθμοκανονική

4. Απόδοση FSO Συστήματος σε κανάλι ασθενών διαλείψεων

κατανομή. Το γεγονός αυτό έχει αποδειχθεί με βάση πειραματικές μετρήσεις. Το λογαριθμοκανονικό μοντέλο στροβιλισμών έχει την παρακάτω pdf [17]

$$f(I) = \frac{1}{2I\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(\ln I - 2\mu)^2}{8\sigma^2}\right), \quad (4.13)$$

όπου

- μ : μέση τιμή
- σ : τυπική απόκλιση
- I : Η οπτική ένταση του σήματος με σπινθηρισμούς (signal irradiance or intensity) [16] και δίνεται από την σχέση :

$$I = I_0 \exp(2X), \quad (4.14)$$

όπου

- I_0 : η ένταση του οπτικού σήματος χωρίς σπινθηρισμούς
- X : κανονική τυχαία μεταβλητή με μέση τιμή μ και τυπική απόκλιση σ .

Για να εξασφαλίσουμε ότι οι διαλείψεις δεν αποσβένουν ούτε ενισχύουν τη μέση ισχύ, κανονικοποιούμε τους συντελεστές των διαλείψεων έτσι ώστε $E[I/I_0] = 1$. Αυτό συνεπάγεται $\mu = -\sigma^2$. Επίσης, για την περιοχή την ασθενών ατμοσφαιρικών διαταραχών η τυπική απόκλιση εξαρτάται από το μήκος L της ζεύξης, από τον κυματικό αριθμό $k=2\pi/\lambda$, όπου λ το μήκος κύματος, και την παράμετρο του δείκτη διάθλασης $C_n^2(z)$ σε ύψος z (που υποτίθεται ότι είναι σταθερό κατά μήκος της διαδρομής διάδοσης), και εκφράζεται από τη σχέση [18]:

$$\sigma^2 = 0.30545 k^{7/6} C_n^2(z) L^{11/6} \approx \frac{\sigma_R^2}{4}. \quad (4.15)$$

Η παράμετρος σ_R^2 ονομάζεται διακύμανση Rytov (Rytov variance) η οποία χρησιμοποιείται ως μέτρο της αντοχής των ατμοσφαιρικών αναταράξεων και δίνεται από τον τύπο [18] :

$$\sigma_R^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}. \quad (4.16)$$

4. Απόδοση FSO Συστήματος σε κανάλι ασθενών διαλείψεων

Για FSO ζεύξεις κοντά στο έδαφος, η ποσότητα C_n^2 μπορεί να πάρει κατά προσέγγιση την τιμή $1.7 \times 10^{-14} m^{-2/3}$ κατά τη διάρκεια της ημέρας και $8.4 \times 10^{-15} m^{-2/3}$ τη νύχτα.

4.4.2 Αθροιστική συνάρτηση κατανομής οπτικής έντασης

Η cdf της I ως αποτέλεσμα της (pdf) προκύπτει ως [18]

$$F(I) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[-\frac{\ln I - 2\mu}{4\sigma^2 \sqrt{2}} \right] = \Phi \left(\frac{\ln I - 2\mu}{4\sigma^2} \right). \quad (4.17)$$

4.4.3 Δείκτης σπινθηρισμών (scintillation index-SI)

Ο δείκτης σπινθηρισμού, σ_I^2 , περιγράφει τη διακύμανση της έντασης ως μια κανονικοποιημένη διακύμανση και δίνεται από την σχέση [20]:

$$\sigma_I^2 = \frac{\langle (I - \langle I \rangle)^2 \rangle}{\langle I \rangle^2} = \frac{\langle I^2 \rangle}{\langle I \rangle} - 1. \quad (4.18)$$

Ο δείκτης σπινθηρισμού μπορεί να εκφραστεί σε σχέση με την τυπική απόκλιση σ

$$\sigma_I^2 = \exp(4\sigma^2) - 1 \approx 4\sigma^2, \quad (4.19)$$

όπου η προσέγγιση είναι έγκυρη μόνο σε συνθήκες ασθενών σπινθηρισμών [21].

4.5 Αξιολόγηση απόδοσης

4.5.1 Πιθανότητα Διαλείψεων

Η πιθανότητα διαλείψεων (Probability of Fade) μπορεί να θεωρηθεί ως μια εκτίμηση του πόσο συχνά η συχνότητα του οπτικού σήματος πέφτει κάτω από ένα καθορισμένο όριο (κατώφλι). Η πιθανότητα διαλείψεων είναι δυνατόν να εκφραστεί και ως παράμετρος κατωφλίου, F_T , που ορίζεται ως ο αριθμός των ντεσιμπέλ κάτω από τη μέση ένταση της ακτινοβολίας [21]

$$F_T = 10 \log \left(\frac{E \left[\frac{I}{I_0} \right]}{I_T} \right) \quad [dB], \quad (4.20)$$

4. Απόδοση FSO Συστήματος σε κανάλι ασθενών διαλείψεων

όπου

- I_T : η τιμή του κατωφλίου της ακτινοβολίας.

Η cdf της I_T ορίζεται ως :

$$F(I_T) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[-\frac{\ln I_T - 2\mu^2}{4\sigma^2 \sqrt{2}} \right] = \Phi \left(\frac{\ln I_T - 2\mu^2}{4\sigma^2} \right), \quad (4.21)$$

όπου

- $I_T = 10^{-\frac{F_T}{10}}$ για $E[I/I_0] = 1$.

4.5.2 Λόγος σήματος προς θόρυβο

Ο στιγμιαίος ηλεκτρικός λόγος σήματος προς θόρυβο δίνεται από την σχέση :

$$\gamma = \left(\frac{\eta \frac{I}{I_0}^2}{N_0} \right). \quad (4.22)$$

Ο μέσος ηλεκτρικός λόγος σήματος προς θόρυβο δίνεται από την σχέση:

$$\gamma_{av} = \left(\frac{\eta E \left[\frac{I}{I_0} \right]^2}{N_0} \right). \quad (4.23)$$

Και επειδή $E[I/I_0] = 1$ λόγω κανονικοποίησης η σχέση γίνεται :

$$\gamma_{av} = \left(\frac{\eta^2}{N_0} \right). \quad (4.24)$$

4.5.3 Ρυθμός σφάλματος δυαδικού ψηφίου (BER)

Το BER της IM/DD με OOK χωρίς διαλείψεις με την παρουσία μόνο AWGN μπορεί να υπολογιστεί ως [17]:

$$P(e|I) = p(1|I)p(e|1,I) + p(0|I)p(e|0,I), \quad (4.25)$$

4. Απόδοση FSO Συστήματος σε κανάλι ασθενών διαλείψεων

όπου $p(1|I)$ και $p(0|I)$ είναι οι πιθανότητες αποστολής 1 και 0 bits, αντίστοιχα, και τα $p(e|1,I)$ και $p(e|0,I)$ χαρακτηρίζουν της υπό όρους πιθανότητες σφάλματος bit, όταν τα λαμβανόμενα bit είναι 1 και 0. Θεωρούμε ότι $p(0|I) = p(1|I) = \frac{1}{2}$ και $p(e|1,I) = p(e|0,I)$. Αποδεικνύεται ότι ισχύει [17]:

$$P(e|I) = p(e|1,I) = p(e|0,I) = Q\left(\frac{\eta I}{\sqrt{2N_0}}\right), \quad (4.26)$$

όπου $Q(\cdot)$ είναι η Gaussian συνάρτηση Q .

Αν θεωρήσουμε ανεξάρτητα τα φαινόμενα των στροβιλισμών και του θορύβου τότε το συνολικό BER υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας την (4.26) με την (4.13) και ολοκληρώνοντας [17] ως

$$P_e = \int_0^{\infty} f(I) Q\left(\frac{\eta I}{\sqrt{2N_0}}\right) dI. \quad (4.27)$$

Συνηθισμένες τιμές για το BER είναι 10^{-6} έως 10^{-8} στα συμβατικά τηλεπικοινωνιακά συστήματα και 10^{-9} έως και 10^{-12} στα οπτικά συστήματα.

Σε σχέση με το μέσο SNR ο παραπάνω τύπος γίνεται :

$$P_e = \int_0^{\infty} f(I) Q\left(\frac{I\sqrt{\gamma_{av}}}{\sqrt{2}}\right) dI, \quad (4.28)$$

Δηλαδή

$$P_e = \int_0^{\infty} \frac{1}{2I\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(\ln I - 2\mu)^2}{8\sigma^2}\right) Q\left(\frac{I\sqrt{\gamma_{av}}}{\sqrt{2}}\right) dI. \quad (4.29)$$

Το παραπάνω ολοκλήρωμα δεν μπορεί να υπολογιστεί σε κλειστή μορφή και για το λόγο αυτό το BER υπολογίζεται στην εργασία αυτή χρησιμοποιώντας αριθμητική ολοκλήρωση.

5

5. Αριθμητικά Αποτελέσματα

5.1 Προγράμματα Προσομοίωσης

Για την μελέτη της συμπεριφοράς του μοντέλου FSO που περιγράφηκε χρησιμοποιήθηκαν δυο μαθηματικά λογισμικά προγράμματα, το Mathematica και το Origin. Παρακάτω περιγράφονται συνοπτικά τα κυριότερα χαρακτηριστικά τους.

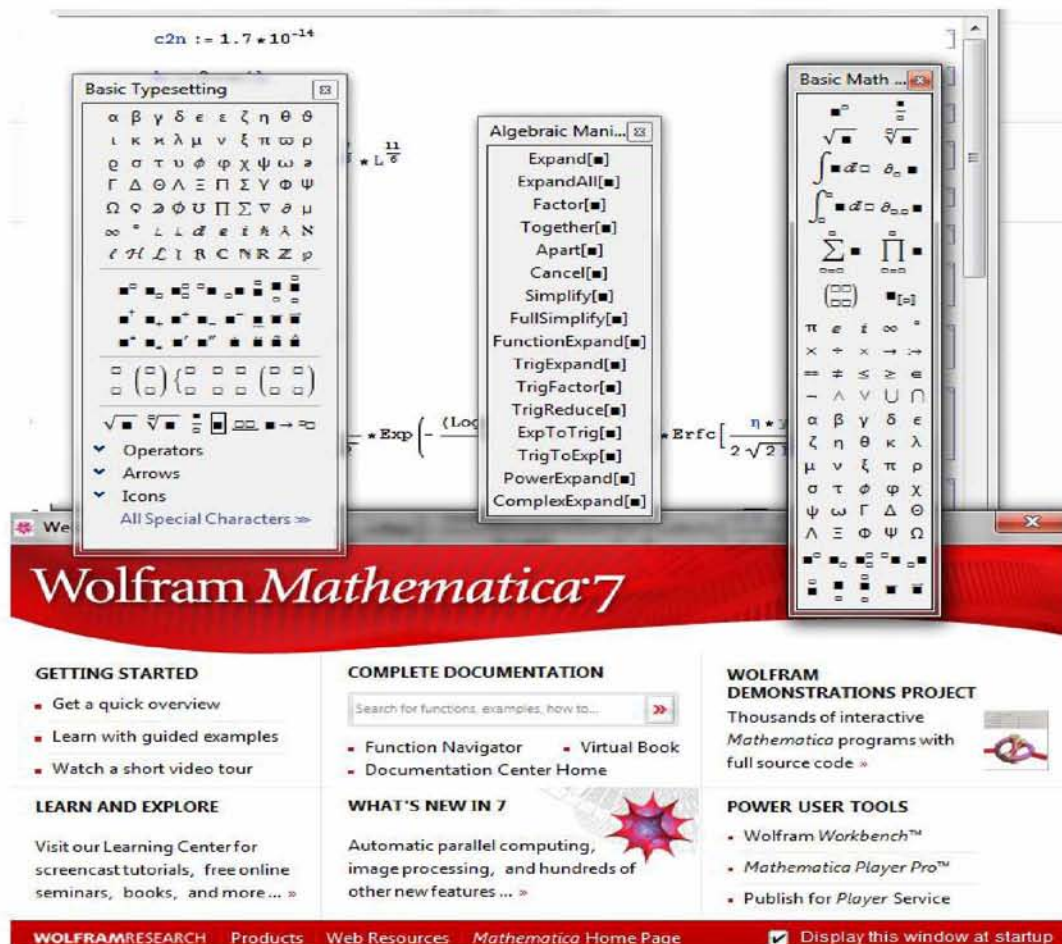
5.1.2 *Mathematica*

Το μαθηματικό λογισμικό πακέτο Mathematica είναι ένα πρόγραμμα που χρησιμεύει για την διεκπεραίωση αναλυτικών και αριθμητικών υπολογισμών καθώς και την δημιουργία γραφικών με χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή. Πρωτοεμφανίστηκε στα τέλη της δεκαετίας του 80 ως ένας πυρήνας (εκτέλεσης εντολών) ο οποίος μπορούσε να προσαρμοστεί σε κάθε λειτουργικό σύστημα (π.χ. Unix, MacOS, Windows κ.α.). Ο κοινός αυτός πυρήνας (Kernel) υπάρχει ακόμη και σήμερα (βελτιωμένος και εμπλουτισμένος), ενώ η σύνδεσή του με τον χρήστη γίνεται μέσω ενός Notebook interface (περιβάλλον εργασίας) το οποίο διαφοροποιείται από λειτουργικό σε λειτουργικό.

Εκτός από τα πολλά πλεονεκτήματα που έχει η ύπαρξη ενός κοινού πυρήνα, δυστυχώς υπάρχουν και ορισμένα μειονεκτήματα. Αυτά έχουν κυρίως να κάνουν με την αρκετά χαμηλή ταχύτητα επεξεργασίας (σε σχέση με τις καθαρές γλώσσες προγραμματισμού), την αστάθεια του προγράμματος και τις αυξημένες απαιτήσεις για μνήμη. Η χαμηλή ταχύτητα γίνεται αισθητή κυρίως όταν ζητείται η επαναλαμβανόμενη εκτέλεση μιας σειράς εντολών (π.χ. Loops) και οφείλεται κυρίως στο ότι το Mathematica χρησιμοποιεί interpreter και όχι

5. Αριθμητικά Αποτελέσματα

compiler όπως οι κλασσικές γλώσσες προγραμματισμού (C, Pascal). Ωστόσο, δεν παύει να αποτελεί ένα δυνατό υπολογιστικό εργαλείο σε περιπτώσεις προβλημάτων που δεν απαιτούν πολύπλοκους αλγόριθμους υλοποίησης.



Σχήμα 5.1 : Περιβάλλον χρήστη Mathematica

Το Mathematica περιλαμβάνει ένα μεγάλο αριθμό εσωτερικών συναρτήσεων και έτοιμων υποπρογραμμάτων που είναι ενσωματωμένα σε μια ευέλικτη και εύκολη στην χρήση γλώσσα προγραμματισμού. Η ακρίβεια των αριθμών στο Mathematica καθορίζεται αυθαίρετα από το χρήστη που μπορεί εύκολα να επεξεργάζεται αναλυτικά, αλγεβρικές παραστάσεις, ολοκληρώματα, διαφορικές εξισώσεις, πίνακες, γραφήματα (2d και 3d) κλπ. Οι εκατοντάδες υπορουτίνες και ενσωματωμένες συναρτήσεις του Mathematica μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε αυτόνομα από τον χρήστη, ο οποίος πληκτρολογεί μια εντολή και έπειτα αφού πατήσει Shift-Enter παίρνει άμεσα την απάντηση, είτε να ενσωματωθούν σε προγράμματα που εκτελούν μαζικά σειρά εντολών με την εντολή Evaluation notebook.

5. Αριθμητικά Αποτελέσματα

Συμπερασματικά, το Mathematica είναι πολύτιμο εργαλείο στα χέρια οποιουδήποτε κάνει τακτικά πολύπλοκους μαθηματικούς υπολογισμούς [22].

Στο σχήμα 5.1 φαίνεται το περιβάλλον χρήστη στην έκδοση Wolfram Mathematica 7.0. Οι εσωτερικές συναρτήσεις του Mathematica που είναι πάνω από 700 περιγράφονται συνοπτικά με χρήση της Βοήθειας (Help) στο Menu "Help".

Μερικές από τις συναρτήσεις του Mathematica που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εξαγωγή των αριθμητικών αποτελεσμάτων είναι:

- Abs : Δίνει την απόλυτη τιμή αριθμού, π.χ.

```
In[1]:= Abs[-4]
```

```
Out[1]= 4
```

- Cos : Δίνει το συνημίτονο γωνίας, π.χ.

```
In[2]:=Cos[0]
```

```
Out[2]=1
```

- Sin : Δίνει το ημίτονο γωνίας

- D : Υπολογίζει την παράγωγο συνάρτησης, π.χ.

```
In[3]:=D[x^2, x]
```

```
Out[3]=2x
```

- Integrate : Υπολογίζει το ολοκλήρωμα συνάρτησης, π.χ.

```
In[5]:=Integrate[x^2, x]
```

```
Out[5]= x^3/3
```

- NIntegrate : Υπολογίζει αριθμητικά το ορισμένο ολοκλήρωμα, π.χ.

```
In[6]:=NIntegrate[Sin[Sin[x]],{x,0,2}]
```

```
Out[6]= 1.24706
```

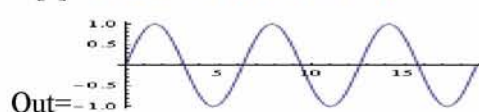
- N[.] : χρησιμοποιείται για τον αριθμητικό υπολογισμό μιας ποσότητας , π.χ.

```
In[7]:=N[ $\sqrt{2}$ ]
```

```
Out[7]=1.41421
```

- Plot : Δίνει την γραφική παράσταση μιας συνάρτησης, π.χ.

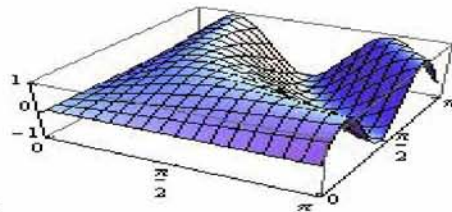
```
In[8]:= Plot[Sin[x], {x, 0, 6 Pi}]
```



- Plot3D:= Δίνει τρισδιάστατη γραφική παράσταση μιας συνάρτησης, π.χ.

In[9]:=

Plot3D [**Sin**[*xy*], {*x*, 0, **Pi**}, {*y*, 0, **Pi**}, **Ticks** → {{0, **Pi**/2, **Pi**}, {0, **Pi**/2, **Pi**}, {-1, 0, 1}}]



Out=

Με την εντολή **Ticks** κάνουμε υποδιαίρεση των αξόνων

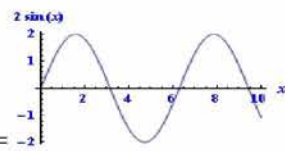
- For loop π.χ. σύνταξη

For [**FT** = 0, **FT** < 35, **Print** [**N** [**cdf2** [**10**^{**-FT**}]]]; **FT** = **FT** + 5]

- AxesLabel : Εισαγωγή ονομάτων στους άξονες

In[10]:=

Plot[2**Sin**[*x*], {*x*, 0, 10}, **AxesLabel** → {*x*, 2**Sin**[*x*]}, **LabelStyle** → **Directive**[**Blue**, **Bold**]]



Out[10]=

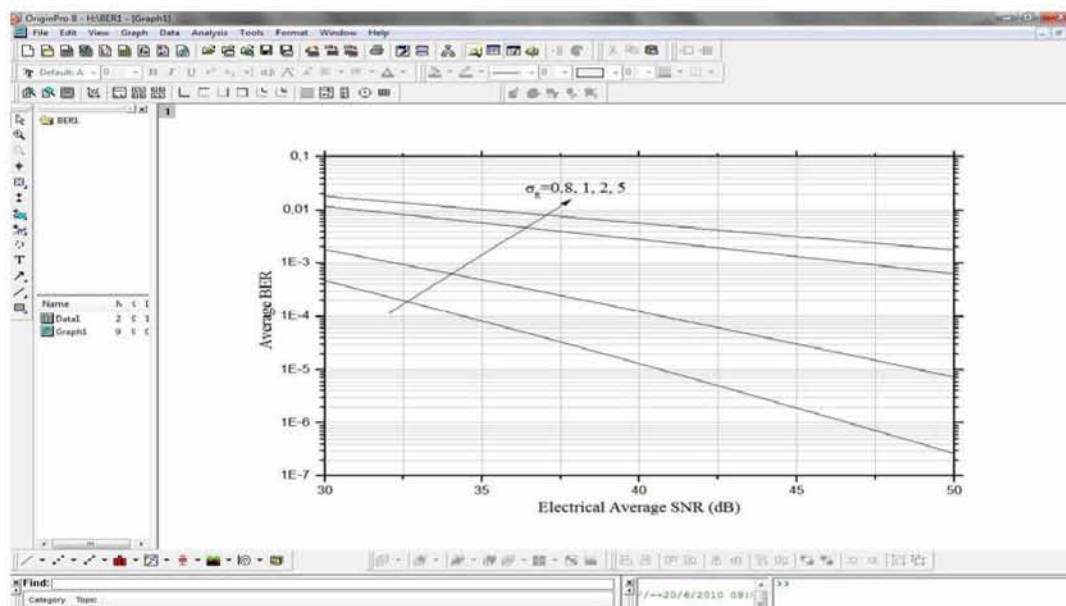
Με την εντολή **LabelStyle** καθορίζουμε το στυλ των αξόνων

5.1.3 Origin

Το Origin είναι μια εφαρμογή λογισμικού πολύ εύκολη στην χρήση, που παρέχει τεράστια ανάλυση των δεδομένων και δυνατότητα δημιουργίας γραφικών παραστάσεων μεγάλης ποιότητας προσαρμοσμένες στις ανάγκες των επιστημόνων και μηχανικών. Περιέχει, πάνω από 60 διαφορετικούς προσαρμοσμένους τύπους γραφημάτων και πρότυπα ανάλυσης, όλα μέσα σε ένα αυστηρά ολοκληρωμένο περιβάλλον εργασίας. Έχει ενσωματωμένες δύο γλώσσες προγραμματισμού, την origin C, που είναι μια C-based compiled γλώσσα προγραμματισμού, και μια γλώσσα προγραμματισμού την LabTalk™. Παρέχει ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης που το καθιστά εύκολο ώστε να γράψει κανείς και να διορθώσει τον δικό του κώδικα. Επίσης, προσφέρει πολλούς τρόπους επεξεργασίας μιας

5. Αριθμητικά Αποτελέσματα

εικόνας, με την εφαρμογή διαφόρων ενσωματωμένων φίλτρων [23]. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το τυπικό περιβάλλον εργασίας του origin 8.1.

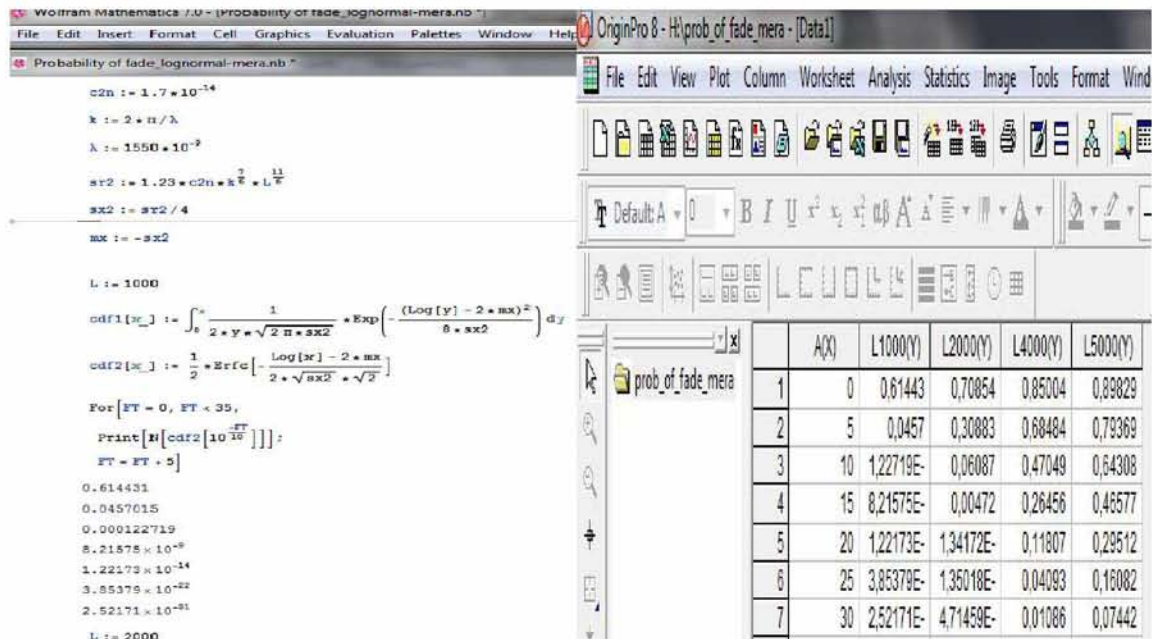


Σχήμα 5.2 : Περιβάλλον χρήστη origin

5.2 Αριθμητικά αποτελέσματα

Για την εξαγωγή των αριθμητικών αποτελεσμάτων που βασίζονται στην ανάλυση του προηγούμενου κεφαλαίου, κάναμε χρήση των 2 παραπάνω λογισμικών πακέτων. Αρχικά, γράψαμε τις εξισώσεις του Κεφαλαίου 4 σε συμβολική μορφή στο περιβάλλον χρήστη του Mathematica (Σχήμα 5.3), και πήραμε χαρακτηριστικές τιμές για διάφορες παραμέτρους. Στην συνέχεια, βάλαμε τις τιμές σε ένα κατάλληλης μορφής λογιστικό φύλλο που παρέχεται στο περιβάλλον χρήστη του Origin (Σχήμα 5.3), και εξάγαμε τα δισδιάστατα σχήματα που παραθέτουμε στη συνέχεια του κεφαλαίου. Για την απεικόνιση των 3D γραφημάτων χρησιμοποιήσαμε την εντολή Plot3D του Mathematica.

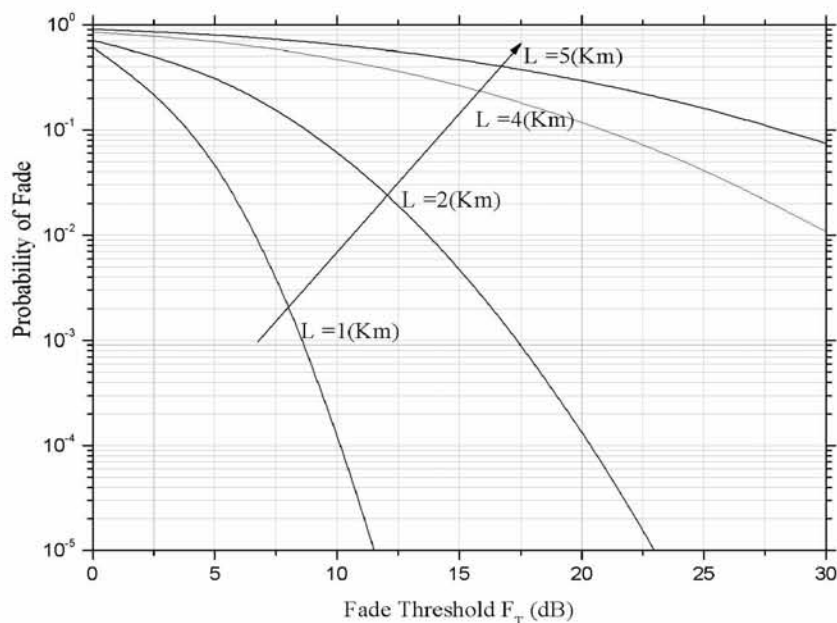
5. Αριθμητικά Αποτελέσματα



Σχήμα 5.3 : Περιβάλλον χρήστη Mathematica και Origin

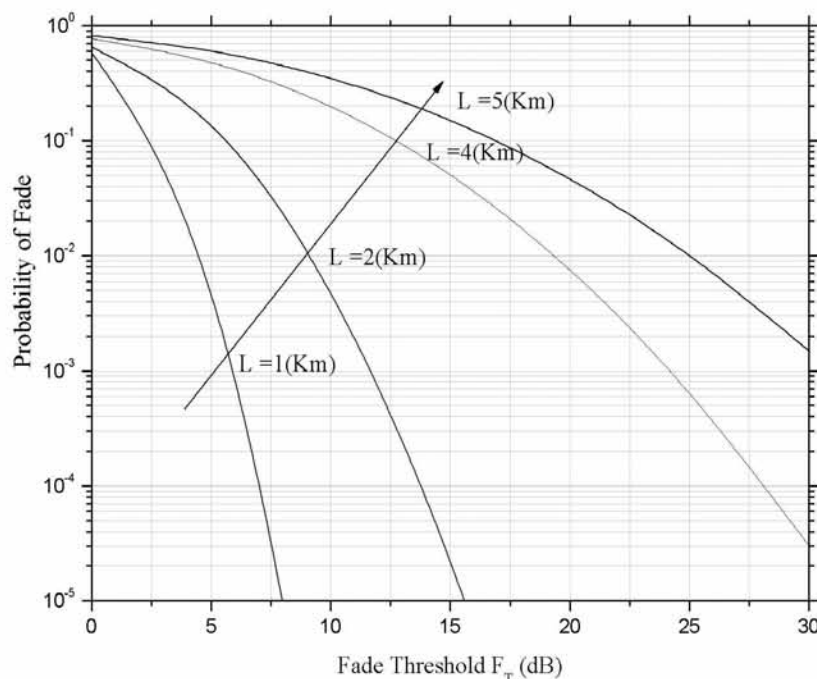
Με βάση τα παραπάνω, η απόδοση του FSO καναλιού κάτω από διάφορες συνθήκες σπινθηρισμών, απεικονίζεται στα παρακάτω σχήματα.

Το Σχήμα 5.4 αναπαριστά την πιθανότητα διαλείψεων για ένα συγκεκριμένο κατώφλι (0-30 dB) και για διάφορες τιμές της απόστασης L , για μήκος κύματος $\lambda=1550$ nm. Χρησιμοποιούμε κυρίως τις ακόλουθες χαρακτηριστικές αποστάσεις: $L_1=1(km)$, $L_2=2(km)$, $L_3=4(km)$ και $L_4=5(km)$ κατά την διάρκεια της ημέρας, δηλαδή η τιμή του δείκτη διάθλασης είναι $C_n^2(z)=1.7 \times 10^{-14} m^{-2/3}$. Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η απόσταση L , και κατ' επέκταση η διακύμανση Rytov σ_R , η πιθανότητα διαλείψεων μεγαλώνει αισθητά. Και αυτό είναι πολύ λογικό γιατί με τη αύξηση του μήκους της διαδρομής το φαινόμενο εστίασης (focusing effect) εξασθενεί από πολλαπλές αυτό-παρεμβολές (self-interference).

Σχήμα 5.4 : Πιθανότητα διαλείψεων ($\lambda=1550$, ημέρα)

Στο Σχήμα 5.5 βλέπουμε πάλι την πιθανότητα διαλείψεων για τις ίδιες τιμές του L , αλλά τώρα κατά την διάρκεια της νύχτας, δηλαδή η τιμή του δείκτη διάθλασης είναι $C_n^2(z) = 8.4 \times 10^{-15} m^{-2/3}$. Παρατηρούμε και εδώ ότι η πιθανότητα διαλείψεων αυξάνεται όσο μεγαλώνει η απόσταση και επίσης μειώνεται αισθητά καθώς αυξάνεται η τιμή του κατωφλίου.

Το Σχήμα 5.6 αναπαριστά το μέσο BER σε συνάρτηση με το μέσο ηλεκτρικό SNR κατά την διάρκεια της ημέρας. Οι τιμές της απόστασης L εδώ είναι πιο μικρές, $L=100(m)$, $L=200(m)$, $L=500(m)$, $L=700(m)$, οι τιμές του SNR κυμαίνονται από 80 έως 95 dB και το μήκος κύματος ίδιο με τα προηγούμενα. Βλέπουμε ότι το BER γίνεται χειρότερο καθώς αυξάνεται η απόσταση. Ακόμη και για $SNR=95$ dB, δεν μπορούμε να επιτύχουμε ένα error rate της τάξης του 10^{-9} , που είναι ο πρακτικός στόχος για ένα FSO σύστημα. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, τα μη κωδικοποιημένα FSO συστήματα δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μια αξιόπιστη μέθοδο και πρέπει να αντικατασταθούν από τα παραδοσιακά RF συστήματα.



Σχήμα 5.5 : Πιθανότητα διαλείψεων ($\lambda=1550$, νύχτα)

Στο Σχήμα 5.7 έχουμε πάλι το μέσο BER συνάρτηση με το μέσο ηλεκτρικό SNR αλλά κατά την διάρκεια της νύχτας. Τα πράγματα και εδώ είναι σχεδόν παρόμοια, και πάλι δεν μπορούμε όμως να φτάσουμε σε κανένα επίπεδο τον στόχο του error rate για τα FSO συστήματα.

Τα επόμενα 4 σχήματα που ακολουθούν είναι παρόμοια με τα προηγούμενα, αλλά για διαφορετικό μήκος κύματος. Βλέπουμε δηλαδή πως συμπεριφέρεται το κανάλι μας για μικρότερο μήκος κύματος, της τάξης των 850 nm.

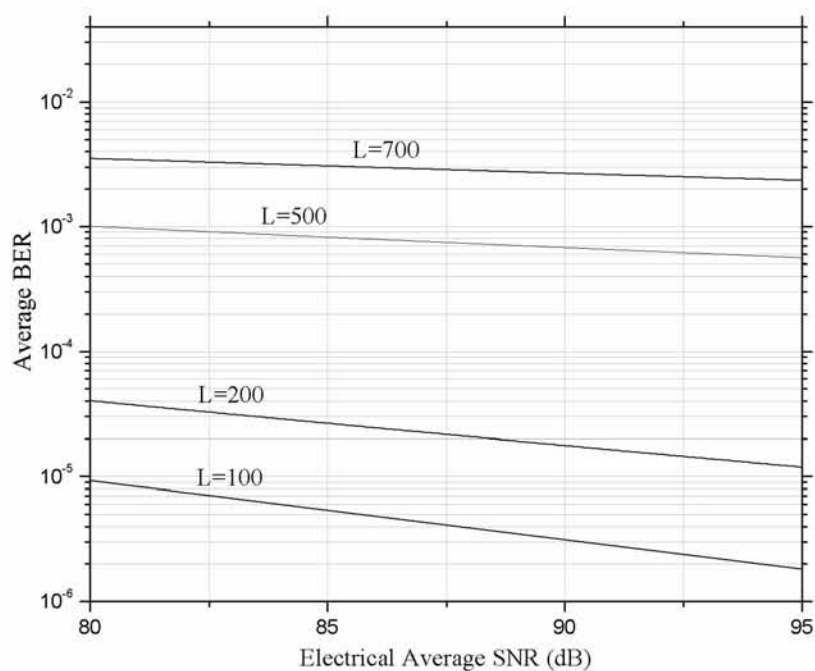
Στο Σχήμα 5.8 βλέπουμε ότι με την αλλαγή του μήκους κύματος αυξήθηκε η πιθανότητα διαλείψεων, και όσο μεγαλώνει η απόσταση αυξάνει με πάρα πολύ γρήγορο ρυθμό.

Στο Σχήμα 5.9, παρατηρούμε ελάττωση της πιθανότητας σε σχέση με την μέρα, η οποία πάλι κυμαίνεται σε υψηλά επίπεδα.

5. Αριθμητικά Αποτελέσματα

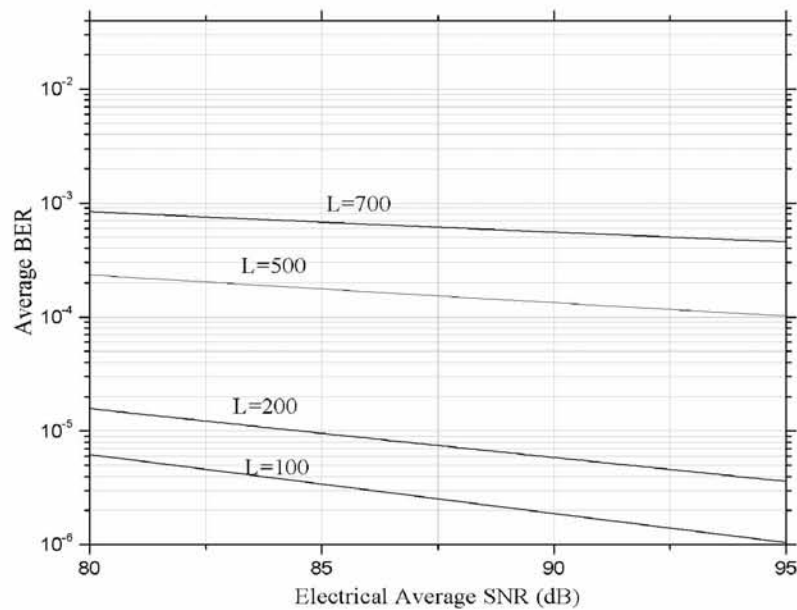
Στα Σχήματα 5.10 και 5.11 παρατηρούμε ότι με την ελάττωση του μήκους κύματος και κατά την διάρκεια της μέρας και κατά την διάρκεια της νύχτας, η κατάσταση χειροτερεύει, και απομακρύνεται ακόμα περισσότερο από τον στόχο του error rate για τα FSO συστήματα.

Παρατηρώντας τα σχήματα μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι και στην περίπτωση της πιθανότητας διαλείψεων και του μέσου BER, τα αποτελέσματα είναι πανομοιότυπα κατά την διάρκεια της μέρας με $\lambda=1550$ με τα αποτελέσματα κατά την διάρκεια της νύχτας με $\lambda=850$.

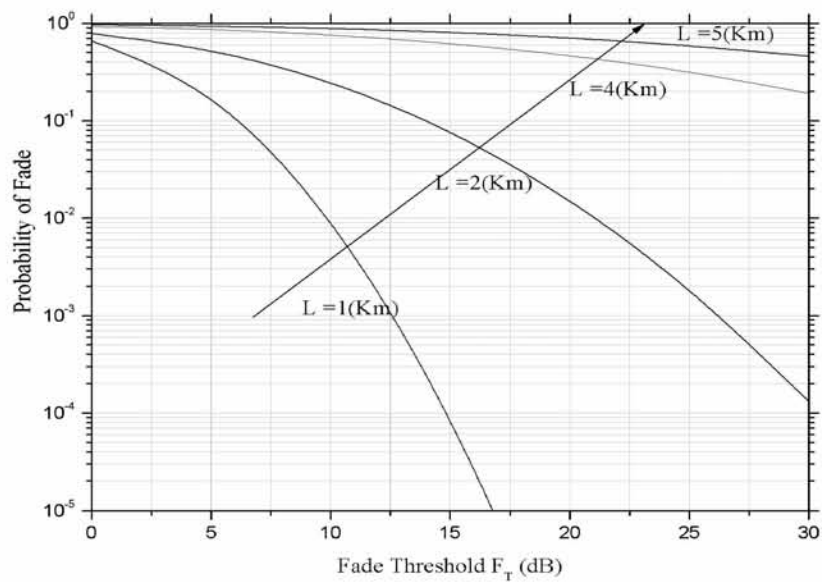


Σχήμα 5.6 : Μέσο BER σε συνάρτηση με το μέσο ηλεκτρικό SNR ($\lambda=1550$, ημέρα)

5. Αριθμητικά Αποτελέσματα

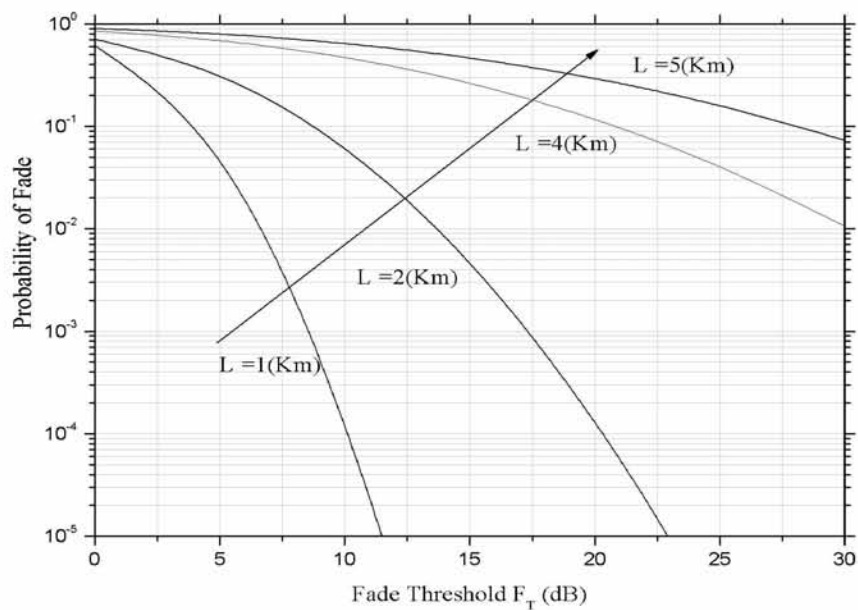


Σχήμα 5.7 : Μέσο BER σε συνάρτηση με το μέσο ηλεκτρικό SNR ($\lambda=1550$, νύχτα)

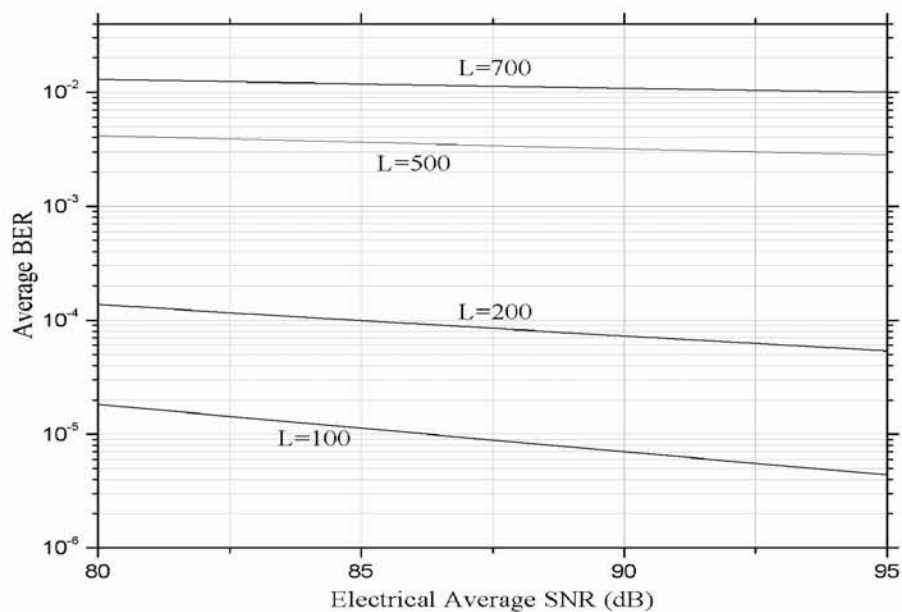


Σχήμα 5.8 : Πιθανότητα διαλείψεων ($\lambda=850$, ημέρα)

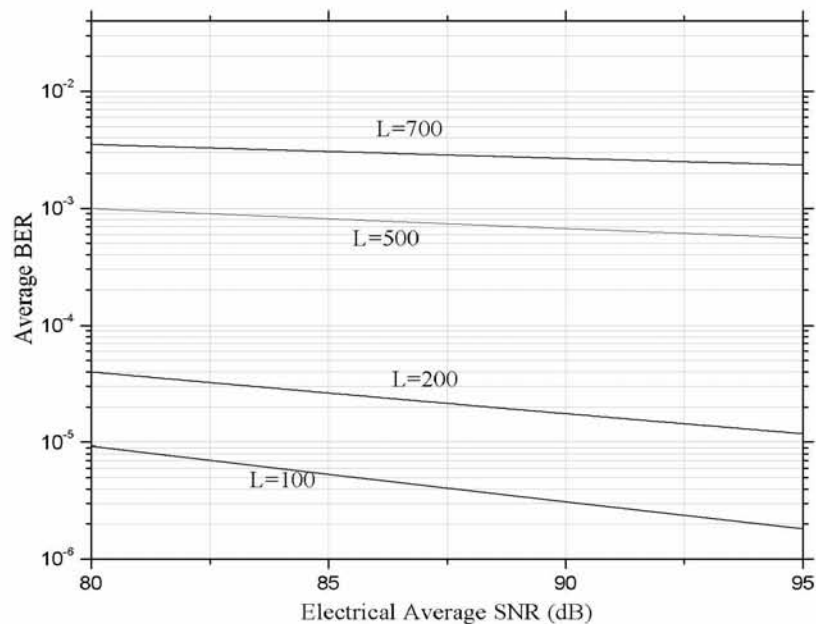
5. Αριθμητικά Αποτελέσματα



Σχήμα 5.9 : Πιθανότητα διαλείψεων ($\lambda=850$, νύχτα)



Σχήμα 5.10 : Μέσο BER σε συνάρτηση με το μέσο ηλεκτρικό SNR ($\lambda=850$, ημέρα)

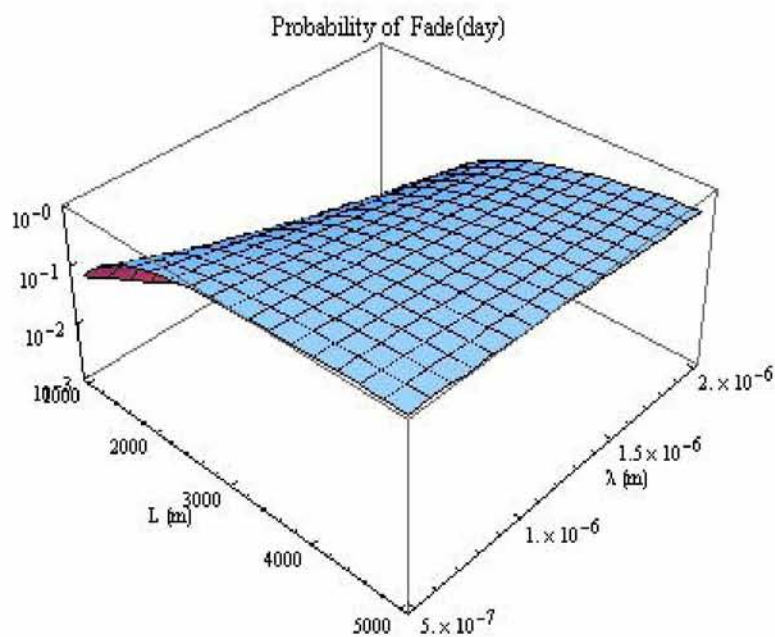


Σχήμα 5.11 : Μέσο BER σε συνάρτηση με το μέσο ηλεκτρικό SNR ($\lambda=850$, νύχτα)

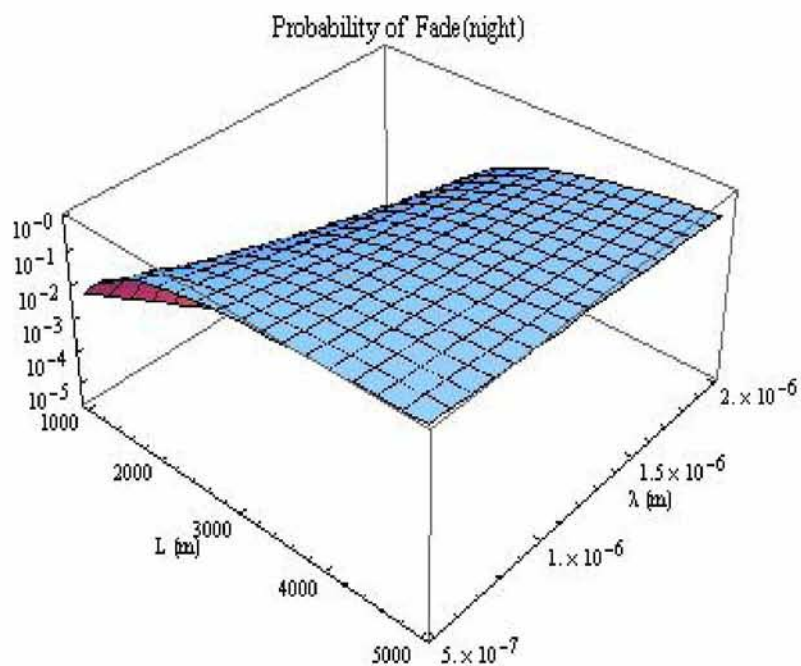
Στα Σχήματα 5.12 - 5.15 βλέπουμε σε τρισδιάστατη μορφή την πιθανότητα διαλείψεων, όπως αυτή διαμορφώνεται κατά την διάρκεια της μέρας και της νύχτας για μήκη κύματος μεταξύ 510^{-7} και 210^{-6} m και αποστάσεις 1 και 5 km

Στα σχήματα 5.16 και 5.17, αναπαριστούμε τον δείκτη σπινθηρισμών σε συνάρτηση της απόστασης και του μήκους κύματος. Παρατηρούμε ότι ο δείκτης σπινθηρισμών και κατά την διάρκεια της ημέρας και κατά την διάρκεια της νύχτας αυξάνεται καθώς αυξάνεται η απόσταση L , και είναι μεγαλύτερος σε μικρότερα μήκη κύματος. Παρατηρούμε επίσης ότι ο δείκτης σπινθηρισμών είναι μικρότερος κατά την διάρκεια της νύχτας και ότι σε πολύ μικρή απόσταση είναι σχεδόν αμελητέος.

5. Αριθμητικά Αποτελέσματα

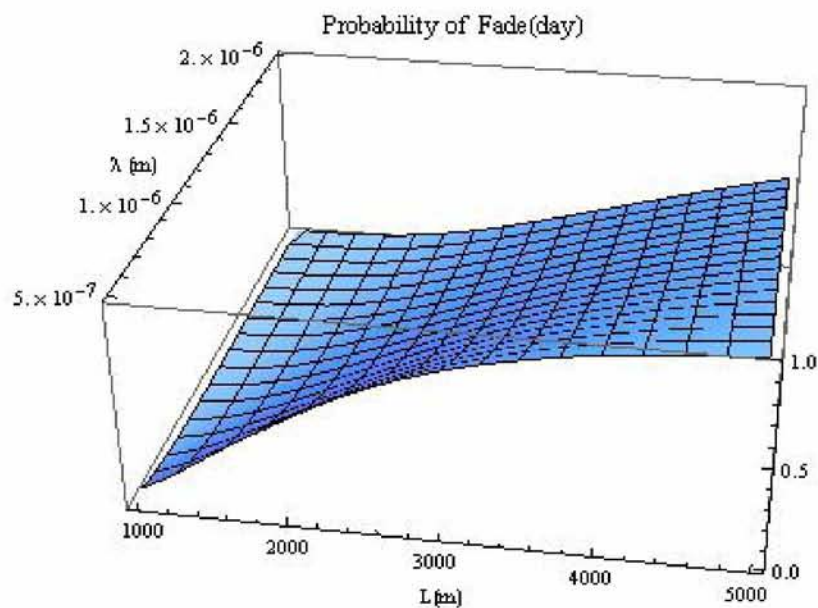


Σχήμα 5.12 : Πιθανότητα διαλείψεων (ημέρα) με $F_T=10\text{dB}$

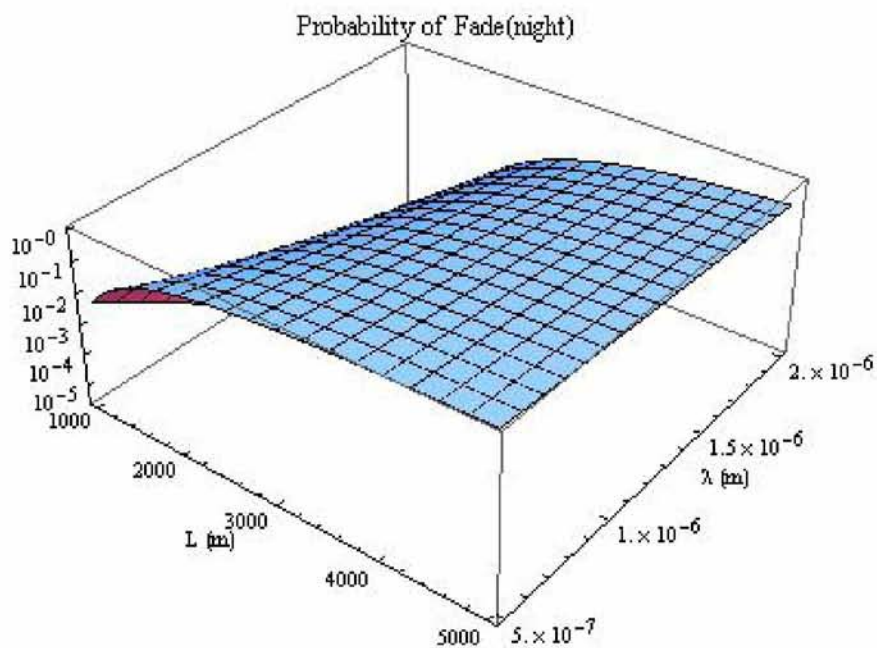


Σχήμα 5.13 : Πιθανότητα διαλείψεων (νύχτα) με $F_T=10\text{dB}$

5. Αριθμητικά Αποτελέσματα

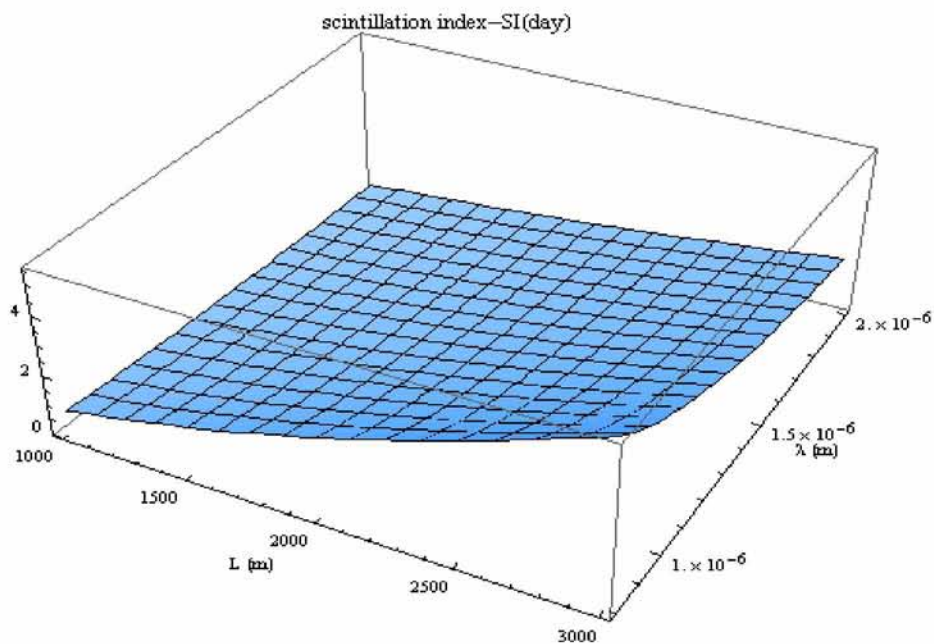


Σχήμα 5.14 : Πιθανότητα διαλείψεων (ημέρα) με $F_T=15\text{dB}$

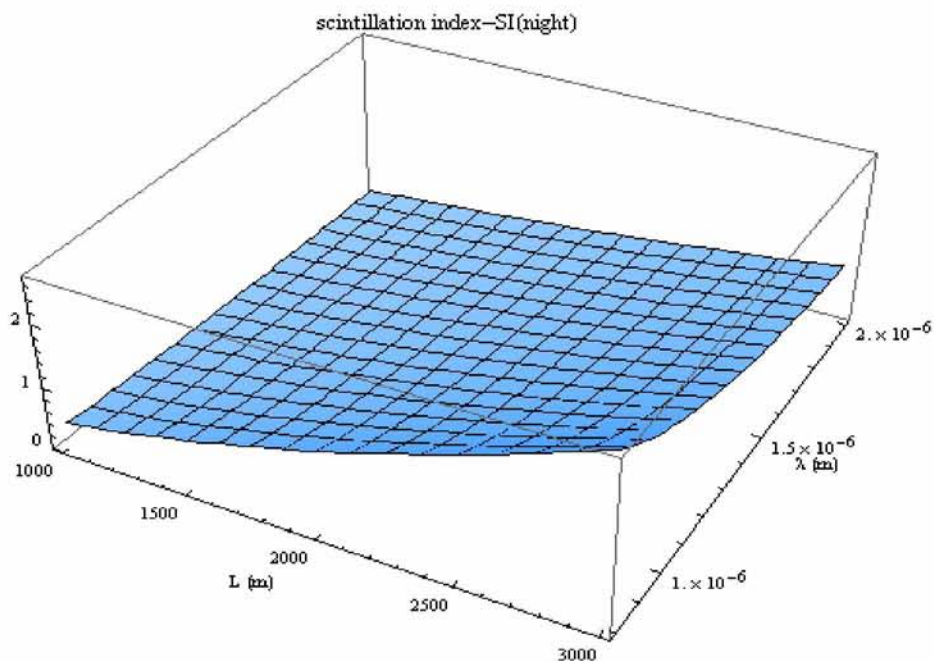


Σχήμα 5.15 : Πιθανότητα διαλείψεων (νύχτα) με $F_T=15\text{dB}$

5. Αριθμητικά Αποτελέσματα



Σχήμα 5.16 : Δείκτης σπινθηρισμών κατά την διάρκεια της ημέρας



Σχήμα 5.17 : Δείκτης σπινθηρισμών κατά την διάρκεια της νύχτας

6

6. Επίλογος

6.1 Σύνοψη και συμπεράσματα

Τα ασύρματα οπτικά συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εναλλακτικοί φορείς ευρυζωνικής επικοινωνίας. Η σύνδεση με οπτικές ίνες συνήθως απαιτεί υψηλό κόστος και χρόνο εγκατάστασης. Παράλληλα, η συντήρησή δικτύων με οπτικές ίνες είναι ιδιαίτερα δαπανηρή. Εν αντιθέσει, οι FSO ζεύξεις περιλαμβάνουν μια και μόνο εγκατάσταση χωρίς μηνιαία επαναλαμβανόμενα έξοδα. Μπορούν εύκολα να τοποθετηθούν π.χ. πίσω από τα παράθυρα ή στις στέγες κτηρίων. Τα FSO συστήματα είναι περισσότερο ασφαλή από οποιοδήποτε άλλα ασύρματα συστήματα ραδιοσυχνοτήτων ή μικροκυματικών επικοινωνιών. Και αυτό διότι οι ακτίνες λέιζερ που παράγονται είναι πολύ στενές, αόρατες, έχουν υψηλή κατευθυντικότητα και είναι δύσκολο να ανιχνευθούν με αναλυτές φάσματος. Ωστόσο η απόδοση τους εξαρτάται κυρίως από ατμοσφαιρικά φαινόμενα και από τα χαρακτηριστικά του καναλιού. Βασικός περιοριστικός παράγοντας είναι το φαινόμενο των στροβιλισμών που παράγεται από διακυμάνσεις της θερμοκρασίας και πίεσης μεταξύ των διαφόρων επιπέδων της ατμόσφαιρας και συντελεί στην εμφάνιση διαλείψεων στην ένταση των οπτικών σημάτων.

Η παρούσα πτυχιακή εργασία ασχολήθηκε με την μελέτη των επίγειων ασύρματων οπτικών συστημάτων σε κανάλι μετάδοσης με διαλείψεις μικρής έντασης. Αρχικά, έγινε η περιγραφή των χαρακτηριστικών του καναλιού και μελετήσαμε την απόδοσή τους χρησιμοποιώντας κατάλληλους δείκτες. Για την μοντελοποίηση των διαλείψεων χρησιμοποιήσαμε το μοντέλο της λογαριθμοκανονικής κατανομής. Δόθηκαν μαθηματικές εκφράσεις για τον δείκτη

σπινθηρισμών, την πιθανότητα διαλείψεων και τον ρυθμό σφαλμάτων για ένα σύστημα διαμόρφωσης IM/DD με OOK το οποίο χρησιμοποιείται στην πράξη. Στη συνέχεια παραθέσαμε ορισμένα αριθμητικά αποτελέσματα με την μορφή κατάλληλων σχημάτων. Τα παραπάνω αποτελέσματα είναι ιδιαίτερα χρήσιμα και πρέπει να λαμβάνονται υπόψη από τηλεπικοινωνιακούς φορείς κατά την εγκατάσταση τέτοιων συστημάτων.

Ως γενικό συμπέρασμα της παρούσας μελέτης μπορεί να εξαχθεί ότι η αύξηση της απόστασης μεταξύ του πομπού και δέκτη αυξάνει το δείκτη σπινθηρισμών και επηρεάζει σημαντική την απόδοση των ασύρματων οπτικών συστημάτων. Παρατηρούμε ότι απαιτείται αυξημένη τιμή κατωφλιού ή σηματοθορυβικού λόγου προκειμένου να πετύχουμε ικανοποιητική απόδοση της τάξης του 10^{-6} . Το γεγονός αυτό περιορίζει την εφαρμογή τους κυρίως μέχρι τα 5 περίπου χιλιόμετρα. Η υιοθέτηση άλλων περιοριστικών παραγόντων όπως π.χ. καιρικά φαινόμενα, απώλειες ευθυγράμμισης κλπ, επιδεινώνει ακόμη περισσότερο την απόδοσή τους και επομένως απαιτούνται ευέλικτες τεχνικές διαμόρφωσης και κωδικοποίησης για την εφαρμογή της τεχνολογίας αυτής στην πράξη. Επιπλέον οι διακυμάνσεις του δείκτη σπινθηρισμού μεταξύ ημέρας και νύχτας επηρεάζει τη συμπεριφορά των ζευξέων και πρέπει να λαμβάνονται και αυτές υπόψη.

6.2 Μελλοντικές επεκτάσεις

Στην εργασία εξετάσαμε την απλή και πιο διαδεδομένη μέθοδο λειτουργίας των FSO συστημάτων με τη μέθοδο IM/DD με OOK σε κανάλι με λογαριθμοκανονική κατανομή διαλείψεων. Έχουν, ωστόσο, αναφερθεί στη βιβλιογραφία βελτιωμένες τεχνικές για την αύξηση της απόδοσης των συστημάτων αυτών. Αρχικά, μια πολύ καλή τεχνική είναι η χρήση μεθόδων κωδικοποίησης (π.χ. συνελκτικοί κώδικες, κώδικες turbo) για τον εντοπισμό και την διόρθωση σφαλμάτων με στόχο τη βελτίωση της αξιοπιστίας και την υψηλή προστασία από το θόρυβο του καναλιού. Η ενσωμάτωση μεθόδων κωδικοποίησης όπως και η μελέτη πιο αποδοτικών διαμορφώσεων π.χ. PPM, PSK, θα μπορούσαν να βοηθήσουν στην κατεύθυνση αυτή.

Εκτός από τα FSO κανάλια, υπάρχουν και τα RF/μικροκυματικά κανάλια που λειτουργούν στα 60 GHz. Η ζώνη αυτή των 60 GHz επιλέχτηκε διότι έχει πολύ μεγάλη αντοχή στις παρεμβολές. Ο συνδυασμός ενός FSO συστήματος με ένα σύστημα RF της ζώνης των 60 GHz αποτελεί το υβριδικό ράδιο-οπτικό (RF/FSO) σύστημα. Το σύστημα αυτό

εκμεταλλεύεται τα πλεονεκτήματα της μικροκυματικής και οπτικής διάδοσης. Συγκεκριμένα τα οπτικά συστήματα είναι επιρρεπή στην ομίχλη ενώ τα μικροκυματικά στην έντονη βροχή. Επειδή ο συνδυασμός και των δυο φαινομένων είναι σπάνιο να συμβεί, είναι φανερό ότι ένα τέτοιο σύστημα θα είναι ιδιαίτερα εύρωστο στις κλιματολογικές συνθήκες [11].

Επίσης, ενδιαφέρουσα είναι και η μελέτη υπό την επίδραση ισχυρών στροβιλισμών. Στην περίπτωση αυτή η κατανομή των διαλείψεων δεν ακολουθεί τη λογαριθμική κατανομή, αλλά πιο μαθηματικά πολύπλοκες κατανομές όπως είναι η κατανομή Κ. Παράλληλα, η επίδραση των καιρικών φαινομένων, ομίχλης, χιονιού και των απωλειών ευθυγράμμισης των οπτικών ακτίνων, αποτελούν αντικείμενα μελλοντικών επεκτάσεων [14].

Βιβλιογραφία

- [1] Free Space Optics, <http://www.freespaceoptics.org>.
- [2] FSO Guide, http://www.fsona.com/technology.php?sec=fso_guide.
- [3] Free-space optical communication, Wikipedia Free Online Encyclopaedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Free_Space_Optics.
- [4] S. Arnon, “Optical Wireless Communications”, chapter in the Encyclopedia of Optical Engineering (EOE), R. G. Driggers ed., Marcel Dekker, pp. 1866 - 1886, 2003.
- [5] Ι.Ν.Τσάλας, Β.Π.Ρήγας “ΜΕΛΕΤΗ ΟΠΤΙΚΩΝ ΖΕΥΞΕΩΝ ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ (LASER)”, Ιούλιος 2003
- [6] Arnulf, J. Bricard, E. Cure, and C. Veret, “Transmission in haze and fog in the spectral region 0.35 to 10 microns” J. Opt. Soc. Am. 47, 491–498, 1957.
- [7] Γιάννης Ν. Τόφης “Επίδοση πολυβηματικών ασύρματων οπτικών συστημάτων”, Ιούλιος 2009
- [8] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/atmos/blusky.html>
- [9] Γ.Κ. Καραγιαννίδης, “Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα”, Εκδόσεις Τζιόλα 2009.
- [10] M. K. Simon and M-S Alouini, “Digital Communication over Fading Channels” John Wiley, Second Edition, 2005.
- [11] ΕΚΠΑ Τμήμα Πληροφορικής & Τηλ/ων- Οικονομικών Επιστημών, “Εισαγωγή στις Τηλεπικοινωνίες”, Σημειώσεις μαθήματος Οικονομική και Διοίκηση των Τηλεπικοινωνιακών Δικτύων, 2006.
- [12] H. Willebrand, and Baksheesh S. Ghuman, “Free-Space Optics: Enabling Optical Connectivity in Today’s Networks”, Sams Publishing, 2002.

- [13] S. J. Dolinar, J. Hamkins, B. E. Moision, and V. A. Vilnrotter, “Optical Modulation and Coding”, chapter in Deep Space Optical Communications, H. Hemmati (ed), John Wiley, 2006.
- [14] S.G. Lambert and W.L. Casey, “Laser Communication in Space”, Artech House, 1995.
- [15] <http://wara.com/article-818.html>
- [16] P.E. Green, “Fiber Optics Networks” New Jersey, USA, 1993.
- [17] S.M. Navidpour, M. Uysal, and M. Kavehrad, “BER Performance of Free-Space Optical Transmission with Spatial Diversity”, IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 6, No. 8, Aug 2007.
- [18] A.A. Farid and S. Hranilovic, “Outage Capacity Optimization for Free-Space Optical Links With Pointing Errors”, Journal of Lightwave Technology, Vol. 25, No. 7, July 2007.
- [19] Log-normal distribution, Wikipedia Free Online Encyclopaedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Log-normal_distribution .
- [20] S. Piazzolla, “Atmospheric Channel”, chapter in Near-Earth Laser Communications, H. Hemmati (ed), Taylor & Francis, 2008.
- [21] L. Andrews, R. L. Philips, and C. Y. Hopen, “Laser Beam Propagation through Random Media”, SPIE Press, 2005.
- [22] Wolfram Mathematica, <http://www.wolfram.com/products/mathematica/index.html>.
- [23] OriginLab, <http://www.originlab.com/> .

Ευρετήριο

A

Additive White Gaussian Noise – AWGN · 31

B

Bit Error Rate (BER) · 34

Bit Rate · 34

D

Demodulator · 18

Detector · 18

Driver · 17

F

Free Space Optics-FSO · 11

Free Space Photonics-FSP · 11

I

Intensity Modulation · 37

J

Johnson–Nyquist noise · 29

L

Laser · 17, 36

Log-normal · 43

M

Mathematica · 53

Mesh · 18

Modulator · 17

O

Optical wireless communications · 11

Origin · 56

Outage probability · 34

P

Point to multipoint · 18

Point to point · 18

Power Efficiency · 35

Preamp · 18

R

Ring · 18

A

Ανίχνευση · 40

Ευρετήριο

Ανιχνευτής · 18

Από σημείο σε πολλά σημεία · 19

Από σημείο σε σημείο · 18

Αποδιαμορφωτής · 18

Αποκωδικοποιητής · 18

Απορρόφηση · 25

Ατμοσφαιρικοί σπινθηρισμοί · 21

B

Βροχή · 23

Γ

Γεωμετρική σκέδαση · 29

Δ

Δαχτυλίδι · 19

Δείκτης σπινθηρισμού · 49

Δέκτης · 15, 17

Διαμόρφωση OOK · 37

Διαμόρφωση · 35

Διαμόρφωση έντασης · 37

Διαμόρφωση PPM · 39

Διαμορφωτής · 17

Δίοδοι LASER · 36

Δίοδοι LED · 36

Θ

Θερμικός θόρυβος · 29

Κ

Κύκλωμα οδήγησης · 17

Κωδικοποίηση Manchester · 39

Κωδικοποιητής · 17

Λ

Λευκός θόρυβος · 31

Λόγος σήματος προς παρεμβολή συν θόρυβο(SINR) · 33

Λόγος σήματος-προς-θόρυβο(SNR) · 32

Μ

Μειονεκτήματα · 21

Ο

Ομίχλη · 23

Οπτικές επικοινωνίες ελεύθερου χώρου · 11

Π

Πιθανότητα διακοπής · 50

Πιθανότητα διαλείψεων · 49

Πιθανότητα λάθους BER · 51

Πλέγμα · 18

Πλεονεκτήματα · 20

Πολυπλεξία · 35

Πομπός · 17

Προενισχυτής · 18

Σ

Σκέδαση · 26
Σκέδαση Mie · 28
Σκέδαση Rayleigh · 27
Σκοτεινό Ρεύμα Ανιχνευτή · 30
Στροβιλισμοί · 21
Συμπληρωματική συνάρτηση σφάλματος erfc · 45
Συνάρτηση Q · 45
Συνάρτηση σφάλματος erf · 45
Συνάρτηση Φ · 45

Φ

Φωτοδίοδοι πυριτίου(PIN) · 40
Φωτοδίοδοι χιονοστιβάδας(APD) · 40

Χ

Χιόνι · 24

Γλωσσάρι

Additive White Gaussian Noise – AWGN : Προσθετικός Λευκός Γκαουσιανός Θόρυβος

Amplitude Shift Keying-ASK : Ψηφιακή Διαμόρφωση Πλάτους

Avalanche photodiode-APD : Φωτοδίοδοι Χιονοστιβάδας

Bandwidth Efficiency : Αποδοτικότητα Φάσματος

Bit-error rate (BER): Ρυθμός Σφάλματος Δυαδικού Ψηφίου

Bit Rate: Ρυθμός Μετάδοσης Δυαδικού Ψηφίου

Channel Capacity : Χωρητικότητα Καναλιού

Cumulative Distribution Function-CDF : Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής

Demodulator : Αποδιαμορφωτής

Detector : Ανιχνευτής

Free Space Optics-FSO) : Οπτικές Επικοινωνίες Ελεύθερου Χώρου

Free Space Photonics-FSP : Φωτονική Ελευθέρου Χώρου

Frequency Shift Keying-FSK : Ψηφιακή Διαμόρφωση Συχνότητας

Full-duplex : Πλήρης Αμφίδρομη

Intensity Modulation/Direct Detection-IM/DD : Διαμόρφωση Έντασης και Άμεσης Ανίχνευσης

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation- LASER : Ενίσχυση του Φωτός μέσω Εξαναγκασμένης Εκπομπής Ακτινοβολίας

Light Emitting Diodes-LED : Δίοδοι Εκπομπής Φωτός

Line of Sight : Οπτική Επαφή

Local Area Network-LAN : Τοπικά Δίκτυα

Log-normal (LN) distribution : Λογαριθμοκανονική Κατανομή

Mesh : Πλέγμα

Metropolitan Area Networks-MANs : Μητροπολιτικά Δίκτυα

Modulator : Διαμορφωτής

Optical Wireless Communications : Οπτικές Ασύρματες Επικοινωνίες

Outage Probability : Πιθανότητα Διακοπής Επικοινωνίας

Performance evaluation : Αξιολόγηση Απόδοσης

Phase Shift Keying-PSK : Ψηφιακή Διαμόρφωση Φάσης

P-INtrinsic-PIN : Φωτοδίοδοι Πυριτίου

Point to Multipoint : Από Σημείο σε Πολλά Σημεία

Point to Point : Από Σημείο σε Σημείο

Power Efficiency : Αποδοτικότητα Ισχύος

Preamp : Προενισχυτής

Probability Density Function-PDF : Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας

Probability of Fade : Πιθανότητα Διαλείψεων

Pulse Position Modulation-PPM : Διαμόρφωση Θέσης Παλμού

Radio Frequency (RF) Systems : Ασύρματα Συστήματα Ραδιοσυχντήτων

Receiver : Δέκτης

Ring : Δαχτυλίδι

Scintillation Index-SI: Δείκτης Σπινθηρισμών

Signal-to-Interference plus Noise Ratio-SINR : Λόγος Σήματος προς Παρεμβολή συν Θόρυβο

Signal-to-Noise Ratio-SNR: Λόγος Σήματος-προς-Θόρυβο

Small scale fading : Διαλείψεις Μικρής Έντασης

Symbol Error Rate- SER : Ρυθμός Σφάλματος Συμβόλου

Turbulence : Στροβιλισμός – Δίνη

Transmitter : Πομπός

